Processus d'apprentissage, savoirs complexes et traitement de l'information : un modèle théorique à l'usage des praticiens, entre sciences cognitives, didactique et philosophie des sciences.

Richard-Emmanuel Eastes

▶ **To cite this version:**

Richard-Emmanuel Eastes. Processus d'apprentissage, savoirs complexes et traitement de l'information : un modèle théorique à l'usage des praticiens, entre sciences cognitives, didactique et philosophie des sciences.. Philosophie. Université Panthéon-Sorbonne - Paris I; Université de Genève. Département de philosophie, 2013. Français. NNT : 2013PA010593 . tel-00904561

HAL Id: tel-00904561

https://theses.hal.science/tel-00904561

Submitted on 14 Nov 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne

Faculté de psychologie et des sciences de l'éducation, Université de Genève

THESE

pour l'obtention du grade de docteur

en philosophie de l'Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne

en science de l'éducation, mention didactique des sciences, de l'Université de Genève

---

PROCESSUS D'APPRENTISSAGE, SAVOIRS COMPLEXES ET TRAITEMENT DE L'INFORMATION : UN MODELE THEORIQUE A L'USAGE DES PRATICIENS, ENTRE SCIENCES COGNITIVES, DIDACTIQUE ET PHILOSOPHIE DES SCIENCES

Présentée et soutenue publiquement par :

Richard-Emmanuel EASTES

le 11 juin 2013 à Paris

Composition du jury :

Jacques DUBUCS, Directeur de Recherche, CNRS, Université Paris 1	Co-directeur
André GIORDAN, Professeur, Université de Genève	Co-directeur
Maryline COQUIDE, Professeure, Institut Français d'Education, ENS Lyon	Rapporteure
Riccardo SPEZIA, Chargé de Recherche HDR, Université d'Evry Val d'Essonne	Rapporteur
Roberto CASATI, Directeur de Recherche, CNRS-EHESS	Examinateur
Claudie HAIGNERE, Présidente, Universcience	Examinatrice
Marie-Noëlle SCHURMANS, Professeure, Université de Genève	Examinatrice

Spécialités : Philosophie des sciences – Epistémologie et didactique des sciences

UFR Philosophie de l'Université Paris 1

Institut d'Histoire et de Philosophie des Sciences et des Techniques (IHPST)
13, rue du Four – 75006 Paris - France

Faculté de psychologie et des sciences de l'éducation de l'Université de Genève

Laboratoire de Didactique et d'Epistémologie des Sciences (LDES)
40 boulevard du Pont-d'Arve – CH-1205 Genève – Suisse

PROCESSUS D'APPRENTISSAGE, SAVOIRS COMPLEXES ET TRAITEMENT DE L'INFORMATION : UN MODELE THEORIQUE A L'USAGE DES PRATICIENS, ENTRE SCIENCES COGNITIVES, DIDACTIQUE ET PHILOSOPHIE DES SCIENCES

Cherchant à établir un pont théorique et pratique entre les sciences de l'éducation, les sciences cognitives et la philosophie des sciences, la thèse développe un modèle didactique à l'interface entre ces disciplines : le *modèle allostérique de l'apprendre* initié et développé par Giordan (1988) *et al.* (1992), qui s'inscrit dans le paradigme des *théories du changement conceptuel*.

Nourri par les travaux récents des psychologues cognitifs sur les processus d'apprentissage tels que les *théories du recyclage neuronal* (Dehaene, 2007) ou de l'*inhibition cérébrale* (Houdé & Tzourio-Mazoyer, 2003), ainsi que sur diverses théories relatives à l'élaboration de la pensée telles que l'*économie comportementale* (Tversky & Kahneman, 1982) ou le *modèle-cadre SRK* (Rasmussen, 1990), ce modèle développe et précise le concept d'*allostérie* à travers la description et la formalisation des processus de déconstruction-reconstruction des *conceptions*, qui ont lieu lors des apprentissages complexes.

De la phase de théorisation du modèle, effectuée par un recours aux formalismes de la *réactivité chimique* en accord avec la métaphore initiale de l'*allostérie*, il est possible de déduire divers *environnements didactiques* opératoires et féconds pour le praticien de l'enseignement et de la médiation scientifiques. Ces prévisions théoriques sont alors mises à l'épreuve de l'expérimentation didactique à travers une recherche de terrain centrée sur la notion d'*expérience contre-intuitive* (Eastes & Pellaud, 2004) menée auprès de différents types de publics.

Mots-clés : Processus d'apprentissage – Traitement cognitif de l'information – Changement conceptuel Allostérie – Conceptions – Heuristiques – Biais cognitifs – Contre-intuitivité – Pédagogie

– PANTHÉON - SORBONNE –
UNIVERSITÉ PARIS 1

UNIVERSITÉ DE GENÈVE
FACULTÉ DE PSYCHOLOGIE ET DES SCIENCES DE L'ÉDUCATION

LEARNING PROCESSES, COMPLEX KNOWLEDGE AND INFORMATION PROCESSING: A THEORETICAL MODEL FOR PRACTITIONERS, BETWEEN COGNITIVE SCIENCE, DIDACTICS AND PHILOSOPHY OF SCIENCE

Aiming at bridging education sciences, cognitive sciences and philosophy of science both theoretically and practically, this thesis develops a didactical model at the interface between these fields: the *allosteric learning model* developed by Giordan (1988) *et al.* (1992), understood in the context *conceptual change theories* paradigm.

Fueled by the recent works of cognitive psychologists on learning processes such as *neuronal recycling* (Dehaene, 2007) or *cerebral inhibition* (Houdé & Tzourio-Mazoyer, 2003), as well as on various theories related to the thought processes such as *behavioral economics* (Tversky & Kahneman, 1982) or the *Skills-Rules-Knowledge framework model* (Rasmussen, 1990), this model develops and refines the concept of *allostery* through the description and formalization of specific processes that take place in complex learning situations: the deconstruction-reconstruction of *conceptions*.

Based on the theorization of the model, done through the use *chemical reactivity* formalisms in line with the initial metaphor of *allostery*, it is possible to deduce various operational and fruitful *didactical environments* for teaching practitioners or science communication professionals. These theoretical projections are then put to the test through didactic experimentation taking the shape of field research on the notion of *counter-intuitive experiment* (Eastes & Pellaud, 2004) conducted with different types of target groups.

Keywords: Learning processes – Cognitive processing of information – Conceptual change – Allostery Conceptions – Heuristics – Cognitive bias – Counter-intuitivity – Pedagogy

– PANTHÉON - SORBONNE –
UNIVERSITÉ PARIS 1

UNIVERSITÉ DE GENÈVE
FACULTÉ DE PSYCHOLOGIE ET DES SCIENCES DE L'ÉDUCATION

TABLE DES MATIERES

Avant-propos *17*

Remerciements *19*

1. Introduction *21*

2. Etat de la question *25*

2.1. Pédagogie, modèles didactiques et apprentissage **25**
2.1.1. Délimitation de l'étude 25
2.1.2. Définitions 26
2.1.3. La notion de modèle en didactique de l'apprendre 27
2.1.3.1. Les modèles didactiques en tant que modèles scientifiques 27
2.1.3.2. Les modèles phénoménologiques 28
2.1.3.3. Transposition aux modèles didactiques 29
2.1.3.4. Théories éducatives et modèles d'enseignement 30
2.1.4. Rôles et usages des modèles de l'apprendre 31
2.1.4.1. Modèles d'apprentissage explicites et implicites 31
2.1.4.2. La dialectique cognition appliquée - pédagogie théorisée 32

2.2. Théories éducatives et modèles d'apprentissage **33**
2.2.1. Les grandes traditions pédagogiques 33
2.2.1.1. Préambule 33
2.2.1.2. Une immense variété d'approches 34
2.2.1.2. Quatre grandes traditions 34
2.2.2. La tradition empiriste 36
2.2.2.1. Manifestations et auteurs 36
2.2.2.2. Description du modèle sous-jacent 37
2.2.2.3. Caractéristiques des pédagogies dérivées 38
2.2.2.4. Avantages et limites 39
2.2.3. La tradition behavioriste 40
2.2.3.1. Manifestations et auteurs 40
2.2.3.2. Description du modèle sous-jacent 41
2.2.3.3. Caractéristiques des pédagogies dérivées 42
2.2.3.4. Avantages et limites 43
2.2.4. La tradition constructiviste 44
2.2.4.1. Manifestations et auteurs 44
2.2.4.2. Description du modèle sous-jacent 46
2.2.4.3. Caractéristiques des pédagogies dérivées 47
2.2.4.4. Avantages et limites 47
2.2.5. Le cas particulier des modèles de changement conceptuel 48
2.2.5.1. L'école anglo-saxonne 49
2.2.5.2. L'école francophone 50
2.2.6. L'approche cognitive 50
2.2.6.1. Les premières théories de psychologie cognitive dans l'éducation 51
2.2.6.2. Le cognitivisme (ou connexionnisme) 51

2.3. Pertinences relatives des modèles de l'apprendre 52
2.3.1. Les articulations entre les modèles 52
2.3.2. La métaphore de la maison 53
2.3.3. Un modèle pour chaque degré d'élaboration du savoir 54
2.3.4. Influence de la situation pédagogique sur le modèle interprétatif 54

3. Cadre théorique et pratique 57

3.1. Justification du cadre théorique 57

3.2. La théorie du changement conceptuel 57
3.2.1. Illustration pratique du changement conceptuel 58
3.2.2. Bases théoriques de l'approche dite du « changement conceptuel » 59
3.2.2.1. Origine historique 59
3.2.2.2. Caractéristiques de la théorie initiale 60
3.2.2.3. Principales critiques formulées à l'encontre de la théorie initiale 61
3.2.2.4. La théorie révisée de Strike et Posner 61
3.2.2.5. Définition actuelle de la théorie du changement conceptuel 62
3.2.3. Le changement conceptuel appliqué à l'éducation 63
3.2.3.1. Découvrir les conceptions préalables des élèves 63
3.2.3.2. Discuter et évaluer les conceptions préalables 63
3.2.3.3. Créer un conflit conceptuel 64
3.2.3.4. Encourager l'accommodation cognitive 64
3.2.4. Analyse critique de la théorie 65
3.2.4.1. Ontologie et scientificité 65
3.2.4.2. Pertinence théorique et cohérence 66
3.2.4.3. Fécondité théorique 68
3.2.4.4. Ampleur descriptive et pertinence pédagogique 69
3.2.5. Difficultés inhérentes au changement conceptuel 70

3.3. Le modèle allostérique de l'apprendre 70
3.3.1. Historique 71
3.3.2. La conception, structure élémentaire du savoir 71
3.3.3. Le cœur du modèle allostérique : la transformation des conceptions 76
3.3.4. L'environnement didactique de 2002 78
3.3.4.1. Trouver du sens aux savoirs abordés, être motivé 80
3.3.4.2. Se confronter - être perturbé, déstabilisé, confronté à d'autres réalités 80
3.3.4.3. Avoir confiance, oser se « lâcher », être accompagné 81
3.3.4.4. Savoir imaginer, oser innover 81
3.3.4.5. Pouvoir mobiliser ses savoirs, les articuler autour de concepts organisateurs 82
3.3.4.6. Elaborer, réfléchir sur ses propres savoirs 82
3.3.4.7. S'approprier des aides à penser 83
3.3.5. Analyse critique de l'approche allostérique de 2002 83
3.3.5.1. Ontologie et scientificité 83
3.3.5.2. Pertinence théorique et cohérence 84
3.3.5.3. Fécondité théorique 86
3.3.5.4. Ampleur descriptive et pertinence pédagogique 86

3.4. Les sciences cognitives 87
3.4.1. Objet et outils 87
3.4.1.1. Définition 87
3.4.1.2. Des études interdisciplinaires 88
3.4.1.3. Les méthodes expérimentales 89
3.4.2. Sciences cognitives et éducation 94
3.4.2.1. Une relation sérieuse et durable 94

3.4.2.2. Une démarche particulière 95
3.4.2.3. Niveaux de contribution et d'implications 96
3.4.3. Apports théoriques 98
3.4.3.1. Les théories naïves 98
3.4.3.2. Les concepts 101
3.4.3.3. Cerveau, aires cérébrales et cartes corticales 101
3.4.3.4. Le recyclage neuronal 104
3.4.3.5. Les chemins de pensée et le modèle-cadre SRK 106
3.4.3.6. Les mécanismes de l'inhibition cérébrale 111
3.4.4. Apports pratiques 116
3.4.4.1. L'apprentissage du calcul et de l'arithmétique 116
3.4.4.2. Les mécanismes de la lecture 118
3.4.4.3. L'attention, l'émotion et la cognition sociale 121
3.4.4.4. La protopédagogie et l'épistémologie naïve 121
3.4.4.5. La mémoire 122
3.4.5. Les « neuromythes », ou ce que les sciences cognitives ne disent pas 122
3.4.5.1. Le mythe des cerveaux droit et gauche et des styles d'apprentissage 123
3.4.5.2. Le mythe de la gymnastique cérébrale 123
3.4.5.3. Les mythes du développement cérébral 123
3.4.5.4. Le mythe de la neuroplasticité 124
3.4.5.5. Le mythe des neurones miroirs, « neurones de l'empathie » 124
3.4.5.6. Le mythe des « intelligences multiples » 125
3.4.6. Limites, risques et perspectives 125
3.4.6.1. La pertinence pédagogique 125
3.4.6.2. Le risque éthique 126
3.4.6.3. Perspectives d'avenir 128

4. Problématique 129

4.1. Préambule 129

4.2. La piste de l'allostérie 129
4.2.1. Un modèle phénoménologique 129
4.2.2. Un modèle physicaliste 130
4.2.3. Un changement de point de vue 131

4.3. Vers un modèle allostérique de l'apprendre formalisé 131
4.3.1. Possibilités de formalisation du modèle 132
4.3.2. Limites et perspectives de transformation du modèle allostérique de 2002 132
4.3.2.1. Structure et socle du savoir 132
4.3.2.2. Processus cognitifs : conceptions et heuristiques 133
4.3.2.3. Accessibilité et inhibition des heuristiques 133
4.3.2.4. Conceptions de contrôle (reconnaissance et orientation) 134
4.3.2.5. Transformations du savoir 134
4.3.2.6. Formalisation et représentation 135
4.3.2.7. Stabilité et robustesse des conceptions 135
4.3.2.8. Contrôles péricognitifs 136
4.3.3. La nécessité d'applications pédagogiques directes 137
4.3.3.1. Formaliser pour pouvoir prédire 137
4.3.3.2. Objectifs : la construction de nouveaux environnements didactiques 137
4.3.4. Validation expérimentale du modèle 137
4.3.4.1. La mise à l'épreuve plutôt que la preuve 137
4.3.4.2. Choix de l'outil de falsification : l'expérience contre-intuitive 137

4.4. Hypothèses de recherche 138

5. Méthodologie 139

5.1. Principe général de l'étude 139

5.2. Elaboration théorique (*Hypothèse 1*) 139

5.2.1. Approche épistémologique 139

5.2.1.1. L'allostérie : de la métaphore à l'analogie – Ecueils potentiels 139

5.2.1.2. Les concepts transversaux 140

5.2.2. Corpus théorique en sciences cognitives et philosophie des sciences 141

5.3. Développements pratiquers et prévisions du modèle (*Hypothèse 2*) 141

5.4. Validation expérimentale (*Hypothèse 3*) 142

5.4.1. Support expérimental de la recherche 142

5.4.1.1. Description de l'activité 142

5.4.1.2. Nature des expériences 142

5.4.1.3. Etat d'esprit 145

5.4.2. Population 145

5.4.3. Constitution du corpus 145

5.4.3.1. L'entretien dirigé comme outil de recherche 145

5.4.3.2. Choix de la méthode d'entretien 146

5.4.3.3. Du diagnostic préalable à la recherche d'approfondissement 147

5.4.3.4. Choix du nombre d'expériences dépouillées 147

5.4.4. Elaboration du protocole de recherche 147

5.4.4.1. Diagnostic préalable (2001) 147

5.4.4.2. Recherche préliminaire (2002) 148

5.4.4.3. Recherche d'approfondissement (2003-2004) 148

5.4.5. Recueil et traitement des données 149

5.4.5.1. Deux types d'entretiens 149

5.4.5.2. Enquête « grand-public » préliminaire 149

5.4.5.3. Approfondissement : pré-test en situation scolaire 150

5.4.5.4. Approfondissement : post-test en situation scolaire 151

5.4.5.5. Traitement des enregistrements 151

5.5. Schéma général de la recherche 152

5.6. Limites de la recherche 152

5.6.1. Limites théoriques 152

5.6.2. Limites pratiques 152

5.6.3. Limites méthodologiques 153

5.6.4. Limites épistémologiques 153

6. Partie théorique : formalisation du modèle allostérique (H1) 157

6.1. Validité et légitimité de l'analogie 157

6.2. Structure et organisation du savoir 159

6.2.1. Représentation du savoir 159

6.2.2. Structure fine des conceptions 160

6.2.3. Préexistence des sous-unités d'information cérébrale 161

6.2.4. La question du socle inné 162

6.2.5. Une structuration étagée 163

6.3. Représentation des processus cognitifs 165

6.3.1. Traitement de l'information et sites actifs 165

6.3.2. Chemins de pensée et heuristiques 167

6.3.2.1. Représentation 167

6.3.2.2. Modes d'action 167
6.3.2.3. L'expérience du croissant de Lune 169
6.3.3. Fonctions d'optimisation 170
6.3.3.1. Fonction d'affinité $\Phi_{affin}(\tilde{\imath})$ 170
6.3.3.2. Fonction de réorganisation $\Phi_{réorg}$ 174
6.3.3.3. Fonction de traitement cognitif $\Psi_{cog}(\tilde{\imath})$ 175
6.3.3.4. Différents niveaux de description du savoir 175
6.3.4. Accessibilité, contrôle et inhibition des heuristiques 176
6.3.4.1. La prééminence d'heuristiques particulières 176
6.3.4.2. Des heuristiques inaccessibles 178
6.3.4.3. Des heuristiques indisponibles 180
6.3.4.4. Des (méta)conceptions de contrôle 182
6.3.4.5. Synthèse 184
6.3.4.6. Contrôle cinétique et contrôle thermodynamique 184

6.4. Transformations du savoir 187
6.4.1. Apprendre... 187
6.4.1.1. Un espace de conceptions ouvert 187
6.4.1.2. Retour sur le modèle allostérique 188
6.4.2. Des processus élémentaires « activés » 189
6.4.2.1. Eléments de cinétique chimique 189
6.4.2.2. Première typologie des processus d'apprentissage 190
6.4.2.3. La notion d'activation 190
6.4.3. Fonctions d'optimisation et d'apprentissage 191
6.4.3.1. Caractéristiques et représentation de la fonction $\Phi_{réorg}$ 192
6.4.3.2. Stabilité des schèmes de pensée et fonction θ d'apprentissage 194
6.4.4. Correspondances... 195
6.4.4.1. Enthalpie et entropie d'apprentissage 195
6.4.4.2. Franchissement de la barrière d'activation 197
6.4.4.3. Enthalpie libre et enthalpie libre d'activation 198
6.4.4.4. Zone proximale de développement 199

6.5. Stabilisation du savoir 199
6.5.1. Fiabilité et caractère opératoire des conceptions 199
6.5.2. Stabilité et justesse 199
6.5.3. Stabilité, ascendant et consensualité 201
6.5.4. Intelligibilité, cohérence et nœuds du savoir 202
6.5.5. Valeur émotionnelle 203
6.5.6. Habitus 204
6.5.7. Principe d'économie 204
6.5.8. Souplesse du savoir 204
6.5.9. Application à la détermination de « profils cognitifs » 205

6.6. Conséquences : de nouveaux leviers d'action pour apprendre 206
6.6.1. Paramètres génériques 206
6.6.2. Un effet de « levée de dégénérescence » 207
6.6.3. Un « effet tunnel » cognitif 208
6.6.4. Un effet « catalyse » 208
6.6.5. Un effet « template » 210
6.6.6. Des contrôles cinétique et thermodynamique 211
6.6.7. Des effets d'affinité temporaire 212

6.7. Contrôles péricognitifs 212
6.7.1. Le niveau infracognitif 213
6.7.2. Le niveau perceptif 213

6.7.3. Le niveau intentionnel 213
6.7.4. Le niveau motivationnel 213
6.7.5. Le niveau métacognitif 214
6.7.6. Le niveau émotionnel (ou affectif) 214

6.8. Cohérence théorique et validation de l'hypothèse de recherche *H1* 216

7. Prévisions du modèle : implications et applications pédagogiques (H2) 217

7.1. Vers de nouveaux environnements didactiques 217
7.1.1. Principe et méthode 217
7.1.2. Plusieurs environnements différents 219
7.1.2.1. Structure et organisation du savoir, dimensions péricognitives 219
7.1.2.2. Processus cognitifs de traitement de l'information 219
7.1.2.3. Processus activés de transformation des conceptions 220
7.1.2.4. Stabilité des structures de pensée 220
7.1.2.5. Avertissements 220

7.2. Description 220
7.2.1. Environnement 1 : Structure et organisation du savoir, dimensions péricognitives 220
7.2.2. Environnement 2 : Processus cognitifs de traitement de l'information 221
7.2.3. Environnement 3 : Processus activés de transformation des conceptions 223
7.2.4. Environnement 4 : Stabilité des structures de pensée 224

7.3. Lecture et utilisation pratique des environnements didactiques 225
7.3.1. Lecture globale 226
7.3.2. Lecture radiale 226
7.3.3. Lecture circulaire 226
7.3.4. Utilisation analytique 226
7.3.5. Utilisation incitative 226
7.3.6. Utilisation formative 227

7.4. Comparaisons avec l'environnement didactique de 2002 227
7.4.1. Trouver du sens aux savoirs abordés, être motivé 227
7.4.2. Se confronter - être perturbé, déstabilisé, confronté à d'autres réalités 227
7.4.3. Avoir confiance, oser se « lâcher », être accompagné 227
7.4.4. Savoir imaginer, oser innover 227
7.4.5. Pouvoir mobiliser ses savoirs, les articuler autour de concepts organisateurs 228
7.4.6. Elaborer, réfléchir sur ses propres savoirs 228
7.4.7. S'approprier des aides à penser 228

7.5. Applications à l'expérience contre-intuitive 228
7.5.1. Structure et organisation du savoir, dimensions péricognitives 229
7.5.2. Processus cognitifs de traitement de l'information 229
7.5.3. Processus activés de transformation des conceptions 229
7.5.4. Stabilité des structures de pensée 230

7.6. Corroboration de l'hypothèse de recherche *H2* 230

8. Partie expérimentale : mise à l'épreuve du modèle allostérique formalisé (H3) 233

8.1. L'expérience contre-intuitive à travers la théorie allostérique – Prévisions théoriques 233
8.1.1. Structure du savoir et traitement de l'information 234
8.1.1.1. Socle du savoir, conceptions clés de voûte et connaissances naïves 234
8.1.1.2. Préexistence des sous-unités d'information cérébrale et cadre de référence 234
8.1.1.3. Emergence de la contre-intuitivité : sites actifs, heuristiques et métaconceptions 234
8.1.1.4. Modes S-R-K, contrôles cinétique et thermodynamique 235

8.1.1.5. Stratégies cognitives et anticipation du résultat 235
8.1.1.6. Paradigmes, plis cognitifs et inhibition 235
8.1.2. Transformations du savoir 236
8.1.2.1. Un espace de conceptions ouvert 236
8.1.2.2. Effets d'une expérience contre-intuitive sur la fonction de traitement cognitif Ψ_{cog} 236
8.1.2.3. Représentation graphique 237
8.1.2.4. Passage de l'état de transition 237
8.1.2.5. Rôle de la zone proximale de développement 238
8.1.3. Eléments complémentaires 240
8.1.4. Synthèse des prédictions théoriques à vérifier 240
8.1.4.1. Prédiction 1 : performance de l'outil 241
8.1.4.2. Prédiction 2 : cadre de référence 241
8.1.4.3. Prédiction 3 : contre-intuitivité 241
8.1.4.4. Prédiction 4 : contexte et mise en scène 241
8.1.4.5. Prédiction 5 : questionnement préalable 241
8.1.4.6. Prédiction 6 : limites de la contre-intuitivité 241
8.1.4.7. Prédiction 7 : risques et effets néfastes 242
8.1.4.8. Prédiction 8 : accompagnement 242

8.2. Résultats 242
8.2.1. Diagnostic préalable 243
8.2.2. Recherche préliminaire (2002) 244
8.2.2.1. Validation de la prédiction 1 : performance de l'outil 244
8.2.2.2. Validation de la prédiction 2 : cadre de référence 245
8.2.2.3. Validation de la prédiction 3 : contre-intuitivité 246
8.2.2.4. Validation de la prédiction 4 : contexte et mise en scène 246
8.2.2.5. Validation de la prédiction 5 : questionnement préalable 246
8.2.2.6. Validation de la prédiction 6 : limites de la contre-intuitivité 247
8.2.2.7. Validation de la prédiction 7 : risques et effets néfastes 249
8.2.2.8. Validation de la prédiction 8 : accompagnement 250
8.2.2.9. Résultats complémentaires 250
8.2.2.10 Apports et limites de la recherche préliminaire 252
8.2.3. Recherche d'approfondissement (2003-2004) 252
8.2.3.1. Effets de contexte et de mise en œuvre (prédictions 1-4) 253
8.2.3.2. Manifestations de non apprentissage (prédictions 6-7) 255
8.2.3.3. Manifestations d'apprentissage (prédiction 8) 258
8.2.3.4. Limites de la recherche d'approfondissement 260

8.3. Synthèse et validation de l'hypothèse de recherche *H3* 260

9. Applications et perspectives 263

9.1. Conseils aux enseignants pour une approche pédagogique « allostérique » 263

9.2. Bonnes pratiques d'utilisation de l'expérience contre-intuitive 264

9.3. L'approche phénoménologique des sciences 266

9.4. Des outils pédagogiques pour la médiation scientifique et l'enseignement 269

9.5. Des outils pour la communication institutionnelle 271

10. Conclusion 275

11. Bibliographie 279

12. Annexes 297

12.1. Autres environnements didactiques 297
12.1.1. Structure et organisation du savoir, processus cognitifs de traitement de l'information 297
12.1.2. Processus activés de transformation des conceptions 298
12.1.3. Stabilité des structures de pensée 299

12.2. Résultats de la recherche expérimentale 299
12.2.1. Tableaux récapitulatifs des entretiens confirmant les prédictions sur l'expérience contre-intuitive 299
12.2.2. Tableaux récapitulatifs des entretiens 304
12.2.2.1. Recherche préliminaire (2002) 304
12.2.2.2. Recherche d'approfondissement : pré-test (2003) 311
12.2.3. Recherche d'approfondissement : post-test (2004) 318
12.2.3.1. La course des balles 318
12.2.3.2. Le ludion 319
12.2.3.3. Les feuilles amoureuses 321

Index des principaux termes techniques utilisés 323

TABLE DES ILLUSTRATIONS

TABLEAUX

Tableau 1 : *Différents régimes de production de connaissances et caractéristiques principales.* *30*
Tableau 2 : *Emboîtement des polarités fondatrices des études cognitives.* *88*
Tableau 3 : *Distinction entre systèmes de pensée 1 et 2 en fonction des processus et de leurs objets.* *110*
Tableau 4 : *Essai de typologie des différentes formes d'inhibition.* *115*
Tableau 5 : *Formulation des questions présentant les expériences contre-intuitives, matériel à disposition.* *143*
Tableau 6 : *Nature des expériences contre-intuitives et notions scientifiques abordées.* *144*
Tableau 7 : *Synthèse des diverses catégories de biais cognitifs possibles.* *184*

FIGURES

Figure 1 : *Articulations entre didactiques et pédagogie.* *26*
Figure 2 : *a/ Développement durable, b/ modèles moléculaires, c/ mappemonde… Autant de « modèles » différents décrivant des comportements idéalisés et utilisant des représentations simplifiées.* *28*
Figure 3 : *Dialectique entre pédagogie théorisée et didactique/cognition appliquée.* *33*
Figure 4 : *Principes de base des différents modèles de l'apprendre (d'après Giordan, 2010).* *35*
Figure 5 : *Illustration humoristique de l'apprentissage par cœur.* *38*
Figure 6 : *Illustration humoristique de l'existence d'une « culture scientifique commune », pas nécessairement partagée par les élèves.* *39*
Figure 7 : *La notion de « cadre de référence », illustrée par l'existence de plusieurs visions du monde selon l'origine géographique.* *40*
Figure 8 : *Plaquette et image extraite de l'outil numérique Ciel, ma planète !* *42*
Figure 9 : *Illustration humoristique de la pédagogie behavioriste… librement inspirée par F. Pellaud de Uderzo et Goscinny (Astérix et les Normands).* *43*
Figure 10 : *Images a/ du spectacle et b/ de l'outil numérique correspondant du projet La lumière en-chantée.* *48*
Figure 11 : *Détermination du modèle de l'apprendre propre à l'explicitation de l'apprentissage d'un apprenant dans une disposition particulière, dans une situation éducative et pour une pédagogie données.* *55*
Figure 12 : *Graphic representation of Heather's misconception regarding the 4 seasons. It shows a "curlicue" path around the sun.* *58*
Figure 13 : *Changer les conceptions liées à l'enseignement. Plutôt que le « Sage sur la scène », le professeur devient le « Guide aux côtés de » dans l'approche constructiviste.* *65*
Figure 14 : *La métaphore de l'iceberg pour représenter les conceptions (2003, publié en 2004).* *72*
Figure 15 : *Illustration humoristique du décalage entre les contenus d'un enseignement frontal et les images mentales susceptibles d'être produites par une conception tenace.* *74*
Figure 16 : *Différentes conceptions de la digestion chez les enfants et jeunes adultes.* *75*
Figure 17 : *Différentes conceptions de la digestion chez les adultes.* *75*
Figure 18 : *Représentation humoristique de la résistance des conceptions à un enseignement trop frontal.* *76*
Figure 19 : *Description du processus de transformation des conceptions (2002).* *76*
Figure 20 : *Environnement didactique accompagnant le modèle allostérique (2002, publié en 2003).* *78*
Figure 21 : *Appareil d'eye tracking, exemple d'utilisation et résultat pour l'analyse de la lecture en saccades (appareil Eyelink II commercialisé par SR-research).* *90*
Figure 22 : *a/ Utilisation de la technique d'électroencéphalographie non invasive sur un enfant de 6 mois. b/ Exemples de signaux obtenus par cette technique.* *91*
Figure 23 : *a et b/ Appareillage utilisé en TRM et principe. c/ Exemples de clichés obtenus par cette technique.* *92*
Figure 24 : *a / Appareillage utilisé en IRMf. b/ Exemples de clichés obtenus par cette technique.* *93*
Figure 25 : *a / Appareillage utilisé en TEP. b/ Exemples de clichés obtenus par cette technique.* *93*
Figure 26 : *a et b/ Appareillage utilisé en MEG et principe. c/ Exemples de clichés obtenus par cette technique.* *94*
Figure 27 : *Mise en évidence d'une connaissance naïve en matière de continuité spatio-temporelle.* *99*

Figure 28 : *Un Mickey disparaît derrière un cache, puis un second. Le cache tombe et deux situations se présentent : 1/ un seul ou 2/ deux Mickey apparaissent à l'endroit où on les avait placés.* 100
Figure 29 : *Comparaison de l'activité cérébrale lors de l'imitation et de l'observation d'expressions émotionnellement marquées chez des enfants au développement normal (haut) et des enfants présentant des troubles autistiques (bas).* 102
Figure 30 : *Choix spontané d'heuristiques particulières en fonction du contexte (chiffres ou lettres). Le symbole médian, identique dans les deux cas, n'est pas interprété de la même manière.* 110
Figure 31 : *« Que boit la vache ? »* 111
Figure 32 : *Description de l'expérience de Houdé et Tzourio-Mazoyer (Nature reviews neuroscience, juin 2003).* 114
Figure 33 : *Modèle cognitif de la lecture (Christophe, 2008).* 120
Figure 34 : *Conceptions et cadres de référence. Le Chat (Geluck, 1999).* 131
Figure 35 : *Différents niveaux d'apprentissage dans l'éducation thérapeutique du patient.* 136
Figure 36 : *Schéma organisationnel de la recherche théorique (H1 et H2).* 154
Figure 37 : *Schéma organisationnel de la recherche expérimentale (H3).* 155
Figure 38 : *La courbe d'activation des chimistes, applicable aux processus d'apprentissage ?* 158
Figure 39 : *Les différentes structures (primaire, secondaire, tertiaire, quaternaire) d'une protéine.* 160
Figure 40 : *Exemples de structure tertiaire.* 161
Figure 41 : *Illustrations analogiques de l'ancrage des 1ères conceptions sur un socle de compétences innées.* 163
Figure 42 : *Représentation de la construction du savoir par étagement progressif des conceptions.* 164
Figure 43 : *Illustration humoristique de la mise en œuvre d'une conception liée à la gravitation terrestre par Mafalda.* 165
Figure 44 : *Schématisation très simplifiée du site actif d'une enzyme permettant la transformation de deux réactifs A et B en un produit C : A + B -> AB -> C.* 166
Figure 45 : *Autres représentations de sites actifs.* 166
Figure 46 : *L'heuristique allostérique : un « tunnel de pensée » vers le site actif (au centre de l'image).* 167
Figure 47 : *Représentations fournies au tableau par l'étudiant et reproduite ici numériquement.* 168
Figure 48 : *Quelle est l'origine de la forme du croissant de Lune ?* 169
Figure 49 : *Coexistence de deux heuristiques dont l'une conduit à un état plus stable évitant le biais cognitif.* 171
Figure 50 : *Deux situations similaires d'un point de vue énergétique, mais non d'un point de vue entropique.* 172
Figure 51 : *Subterfuge (induisant un effet de contexte) utilisé pour représenter le croissant de Lune.* 177
Figure 52 : *De l'électron 1s et de l'électron 2p, lequel est le plus proche du noyau ?* 179
Figure 53 : *La notion de plan nodal : « Comment fait l'électron π pour passer d'un côté de l'orbitale à l'autre ? »* 179
Figure 54 : *Illustration humoristique de la notion de paradigme de pensée.* 180
Figure 55 : *Blocage d'un site actif par déformation conformationnelle induite par la présence d'un inhibiteur sur un autre site.* 181
Figure 56 : *Illustration des processus des inhibitions a/ non-competitive et b/ competitive.* 182
Figure 57 : *Un exemple d'heuristique contrôlée par une métaconception après une phase d'apprentissage.* 184
Figure 58 : *Voies parallèles conduisant, sous contrôles cinétique et thermodynamique, à des produits différents.* 185
Figure 59 : *Représentation plus générale du modèle allostérique, sous-entendant l'existence de plusieurs types de transformations possibles.* 189
Figure 60 : *Courbes d'apprentissage représentant des processus a/ non activé et b/ activé.* 191
Figure 61 : *Représentations tridimensionnelle de la surface d'énergie et des lignes de niveau correspondant au système H_a-H_b + H_c ⇔ H_a + H_b-H_c.* 193
Figure 62 : *a/ Coupe transversale illustrant la largeur de b/ la vallée empruntée par le système.* 193
Figure 63 : *a/ Coupe verticale dans la surface d'énergie et b/ déploiement en deux dimensions de la coordonnée de réaction (dans notre cas, coordonnée d'apprentissage).* 194
Figure 64 : *Lien entre l'entropie d'activation et les courbures de l'hypersurface à différents moments de la transformation du savoir.* 196
Figure 65 : *Trajectoire conduisant à un non apprentissage, en dépit d'une impulsion initiale suffisante, l'approche des réactifs ayant eu lieu de manière inappropriée.* 196
Figure 66 : *Apprentissage conduisant à un état final de moindre stabilité que l'état initial.* 197
Figure 67 : *Exemple d'affiches de l'UDC, le parti d'extrême droite Suisse, flattant les peurs populaires à travers des idées simplistes mais plus difficile à contrer qu'il ne l'est de les émettre.* 200
Figure 68 : *Fonctionnement parfaitement logique produit à partir d'une conception fausse.* 200

Figure 69 : *Représentation graphique et schématique de la déstabilisation d'une conception lors de l'oubli progressif d'une information la rendant temporairement opératoire.* *201*
Figure 70 : *Coexistence pacifique de deux conceptions contradictoires mais facilement interchangeables.* *203*
Figure 71 : *Effet de levée de dégénérescence dans le processus de déstabilisation-stabilisation de deux conceptions issues d'un même pli cognitif.* *207*
Figure 72 : *Juxtaposition des courbes d'activation d'une voie normale très activée et de la voie catalysée plus facile à emprunter.* *209*
Figure 73 : *Représentations photographique et schématique de l'expérience du ludion.* *210*
Figure 74 : *Cas général représentant une situation permettant des contrôles cinétique et thermodynamique conduisant à des conceptions différentes.* *211*
Figure 75 : *Représentation générique des environnements didactiques qui seront déduits de la partie théorique.* *218*
Figure 76 : *Représentation du premier environnement didactique déduit de la partie théorique.* *221*
Figure 77 : *Représentation du deuxième environnement didactique déduit de la partie théorique.* *222*
Figure 78 : *Représentation du troisième environnement didactique déduit de la partie théorique.* *224*
Figure 79 : *Représentation du quatrième environnement didactique déduit de la partie théorique.* *225*
Figure 80 : *Autre exemple de conceptogramme décrivant les chemins praticables à travers les paysages de l'apprendre.* *231*
Figure 81 : *Illustration graphique de l'effet d'une expérience contre-intuitive sur l'hypersurface d'énergie potentielle des conceptions et sur le passage de l'état de transition.* *238*
Figure 82 : *Image contre-intuitive permettant de mettre en doute l'idée selon laquelle la forme du croissant de Lune proviendrait de l'ombre de la Terre.* *239*
Figure 83 : *Hergé : on a marché sur la Lune (1954). Une image suffisante pour permettre la compréhension de la forme du croissant de Lune chez certaines personnes.* *239*
Figure 84 : ***«*** *Le feu a-t-il une ombre ? », ou comment transformer une carte postale trouvée sur la place Dja mâa El-Fna (Marrakech) en outil pédagogique contre-intuitif.* *261*
Figure 85 : *Exemple d'objets contre-intuitif : les représentations du peintre M.C. Esher telles que, par exemple, le ruban à une seule face et un seul bord intitulé Moebius Band II.* *266*
Figure 86 : *Un état d'esprit peu « phénoménologique ».* *269*
Figure 87 : *Etude de la propagation de la lumière par Mlle Renoncule, clown de science chez les Atomes Crochus.* *271*
Figure 88 : *Modélisation de la réception d'une information par le système cognitif individuel, prenant en compte la dimension émotionnelle, dans la perspective de l'élaboration de campagnes de communication.* *273*

AVANT-PROPOS

« Qui a la prétention d'enseigner ne doit jamais cesser d'apprendre. »
John Cotton Dana (1856–1929), bibliothécaire et directeur de musée américain.

Quoi de plus désarmant que les difficultés de compréhension d'un élève lorsque les sciences vous ont toujours paru limpides ? Comment ne pas perdre espoir lorsqu'après une heure de cours particulier sur les fractions, vous croisez un regard vide laissant transparaître l'incompréhension la plus totale, alors que leur manipulation vous a toujours semblé naturelle et intuitive ? Comment ne pas se fâcher quand la copie que vous corrigez contient toutes les erreurs que vous aviez soigneusement dénoncées, et qu'elle n'aurait finalement pas été très différente si le contrôle avait eu lieu avant le cours ?

Mais aussi… Comment comprendre le rejet de l'école et des matières scientifiques lorsque vous vous êtes toujours senti-e adapté-e au système scolaire ? Ou comment admettre ce qui est parfois considéré comme des manifestations de défiance de la société civile envers les travaux des chercheurs, qui nous disent pourtant nous préparer un monde toujours meilleur ? Et enfin, pourquoi les élèves et nos concitoyens ne partagent-ils pas la même passion que nous, la même confiance pour les connaissances, la démarche et le progrès scientifiques ?

Après une scolarité facile, des études dorées et une orientation vers la recherche et l'enseignement de la chimie dans une prestigieuse institution, c'est probablement la quête des réponses à ces questions, dont je m'aperçois aujourd'hui qu'elles étaient empreintes d'une certaine naïveté, qui allait me conduire, un jour, à engager un travail de thèse non pas en chimie, mais sur un sujet relevant de la didactique, des sciences cognitives et de la philosophie des sciences.

Cette thèse, qui marque la concrétisation d'une évolution académique régulière depuis une dizaine d'années, a deux origines. Toutes deux sont liées aux affres que vivent les enseignants et les chercheurs lorsqu'ils sont, comme c'est presque toujours le cas, à la fois d'anciens bons élèves et passionnés par leur domaine de spécialisation.

La première relève d'une passion très personnelle pour toutes les formes de partage de la connaissance, depuis l'enfance. Une passion concrétisée sur le terrain par des expériences multiples d'enseignement des sciences à tous les niveaux (du primaire aux concours d'entrée des Ecoles normales supérieures), en France et dans divers pays francophones africains. Une passion nourrie de multiples expériences de formation d'enseignants et de chercheurs, de médiation scientifique auprès de publics divers, d'invention ou de développement de concepts pédagogiques variés, ou encore de missions d'expertise sur la communication des sciences pour l'industrie. Mais une passion qui, pour être complète, devait s'accompagner d'une réflexion approfondie sur la question de la manière dont on apprend.

La nécessité d'accéder à la compréhension des processus qui régissent l'*élaboration des savoirs* chez les personnes en situation d'apprentissage est devenue évidente pour moi en 2001, lors de ma rencontre avec André Giordan et Francine Pellaud, respectivement directeur et assistante au *Laboratoire de Didactique et Epistémologie des Sciences* (LDES) de l'Université de Genève. Comme bon nombre de vulgarisateurs et pédagogues en herbe, j'ignorais totalement cet aspect de l'apprentissage au profit de celui de la *transmission des savoirs*, que j'estimais primordial et prééminent. Pour bien enseigner ou bien vulgariser, il suffisait de bien connaître son sujet et d'adapter son niveau de formulation aux connaissances de son *public*.

Tous deux m'ont très rapidement ouvert les yeux sur cette erreur banale, d'où provenaient pourtant bien des difficultés que je rencontrais dans ma pratique d'enseignant, de vulgarisateur, voire du « prosélyte de la chimie » que j'étais alors. A partir de cette double rencontre aux *Journées de Chamonix* (JIES) auxquelles je m'étais pourtant rendu à reculons (et dont j'ai repris depuis l'organisation), je ne devais plus jamais douter de l'importance d'accéder à la compréhension de l'ensemble des phénomènes qui peuvent être regroupés sous le vocable général de *processus d'apprentissage*, et qui conditionnent en outre les capacités d'action, d'analyse et de compréhension des individus. Entreprendre une thèse sur le sujet constituait dès lors la meilleure manière de comprendre cette dimension fondamentale de l'enseignement, dans le double but de 1/ parfaire mes compétences pédagogiques et 2/ apporter une modeste contribution à ce sujet complexe en y faisant converger mes connaissances, acquises dans divers champs disciplinaires : la chimie, la didactique des sciences, les sciences cognitives, l'épistémologie, la sociologie et la philosophie des sciences.

La seconde origine de ce travail est militante. Pour avoir trop erré parmi les incompréhensions de mes élèves, pour n'avoir pas été instruit des pièges de la vulgarisation scientifique grand public avant de m'y investir, pour n'avoir pas compris assez tôt l'origine des craintes de nos concitoyens à l'égard des sciences et des techniques, et surtout pour continuer de voir nombre de mes collègues, enseignants, chercheurs et industriels faire les mêmes erreurs que moi, en rejetant notamment systématiquement leurs problèmes de communication sur la fainéantise des élèves, l'ignorance des gens ou l'obscurantisme des médias, j'ai voulu, par ce travail, communiquer ce que j'avais découvert. Reformuler quelques idées brillantes développées dans le champ des sciences de l'éducation, les approfondir, puis les adresser à la communauté des « passeurs de savoirs » pour les partager et contribuer à l'amélioration de la formation des petits et des grands.

Dans la lignée des « militants de l'apprendre » que constituent les membres du LDES, rassemblés depuis des années derrière André Giordan (1987), notre projet consiste autant à **accompagner et satisfaire un public de praticiens** qu'à se conformer aux canons de la recherche académique. Très théorique, ce travail n'en a pas moins pour objectif de **produire des outils pour l'action pédagogique et la communication scientifique, académique ou institutionnelle**, en fournissant des « clés » de compréhension relatives aux obstacles inhérents à ces pratiques. L'avoir à cette fin rédigé dans une perspective éditoriale pourra justifier un style qui s'éloigne parfois du langage académique, ainsi que l'utilisation occasionnelle de métaphores, de schématisations, voire d'illustrations humoristiques et d'exemples très (peut-être trop) concrets, relativement inhabituels dans un travail de doctorat, mais toujours introduits pour faciliter la compréhension ou rendre la lecture plus agréable.

REMERCIEMENTS

« On rencontre de nombreux grands penseurs, mais on reconnaît « le sien » lorsqu'il vous dévoile des vérités qui étaient déjà en vous mais dont vous n'étiez pas conscient, ou vous permet de formuler des choses qui étaient obscurément présentes en vous et que vous n'arriviez pas à exprimer clairement. »

Edgard Morin (2002), sociologue français.

Apprendre et enseigner, aimer et être aimé, vivre et donner la vie… Voilà les trois objectifs majeurs qu'adolescent je confiai à mon cahier de notes pour qu'ils guident mon existence. Etrangement, c'est la même personne qui allait un jour me permettre de les réaliser et de les voir s'épanouir tous les trois, dans leurs plus belles expressions. D'un point de vue chronologique, ce travail de doctorat constitue l'aboutissement du dernier volet qu'il me restait à concrétiser dans cette trilogie, mais rien n'en aurait été possible sans « elle ».

Merci donc à Francine de m'avoir passionnément enseigné tout ce qu'elle savait sur le sujet, puis de m'avoir patiemment accompagné, encouragé, corrigé, stimulé dans cette longue maturation de mes idées. Merci surtout pour sa compréhension et le temps qu'elle m'a laissé prendre pour réaliser ce travail.

Merci à André de m'avoir ouvert les yeux sur les fonctionnements de la pensée, pour m'avoir encouragé à entreprendre cette thèse, et en avoir initié le propos. Il est des idées tellement faites pour vous qu'elles semblent vous attendre patiemment ; telle un coup de foudre, la rencontre est vive et passionnée, comme elle le fut pour moi à la lecture du premier chapitre d'*Apprendre !* (Giordan, 2000). Comme dans une relation amoureuse, la progression est longue et semée d'embûches. Mais à l'inverse de la relation de couple, on est accompagné de l'extérieur. Merci donc surtout, André, d'avoir su me guider de la manière qui convenait à mon tempérament, d'avoir accepté mes atermoiements avec patience et d'avoir consacré de ton temps précieux à un travail longtemps incertain.

Merci encore à tous les deux d'avoir changé ma vision du monde, de la science, de la société et de moi-même, et d'être pour beaucoup dans tout ce que je suis et dans tout ce que je j'essaie d'entreprendre aujourd'hui.

Merci à Jacques et Marie-Noëlle de m'avoir fait suffisamment confiance pour accepter de co-diriger cette thèse, pour leurs apports respectifs précieux, leurs conseils, leur temps et leurs encouragements. Merci également à Roberto Casati, Marilyne Coquidé, Claudie Haigneré et Riccardo Spezia pour avoir répondu favorablement à mon invitation à participer au jury chargé de l'évaluer.

Merci à Livio pour son enthousiasme, ses conseils, le temps qu'il a accordé à la relecture de ce manuscrit et la pertinence de ses remarques, aux *Atomes Crochus* pour l'incroyable terrain d'expérimentations pédagogiques qu'ils constituent, aux membres de *Traces* pour la rigueur de pensée et la richesse des points de vue, toujours renouvelés, qu'ils m'offrent au quotidien.

D'un point de vue un peu moins professionnel enfin, merci à Daniel Raichvarg de m'avoir permis de rencontrer Francine et André, à mes parents pour m'avoir donné le goût des sciences et du partage des connaissances, à l'équipe qui m'entoure dans mes activités parisiennes pour sa compréhension, et plus particulièrement à Meriem et à Anne pour leur soutien logistique.

1. INTRODUCTION

« On se lasse de tout, excepté d'apprendre. »
Virgile (-70–19), poète latin.

La manière dont les individus se représentent, élaborent, transforment et communiquent leur savoir, individuellement ou collectivement, a des implications majeures à tous les niveaux de l'organisation de la société, qui nécessitent le développement de recherches et d'innovations constantes pour perfectionner nos manières de penser, d'apprendre et de communiquer. Ces préoccupations couvrent en effet des domaines aussi vastes que l'acquisition du langage par l'enfant, la créativité du chercheur, l'éducation scientifique, la formation professionnelle continue, la vulgarisation scientifique, la communication institutionnelle des organismes de recherche, le traitement des controverses sociotechniques, la communication de crise et la gestion de l'image de l'industrie, la formation des médecins, l'éducation thérapeutique des patients, la formation des journalistes, le développement de l'esprit critique face aux médias…

Au niveau de l'école par exemple, et depuis des siècles, les pédagogues ont imaginé des techniques variées pour mieux instruire les élèves (Houssaye, 1994 ; Pellaud, 2002). De ce point de vue, la recherche depuis le début du XX^{ème} siècle a été particulièrement riche en innovations de toutes sortes : apparition des pédagogies actives (Binet, 1911 ; Binet *in* Mialaret, 1958 ; Montessori, 1916 ; Decroly, 1937 ; Dewey, 1897 & 1947 ; Freinet, 1956…), introduction de la « démarche expérimentale » dans les cours de sciences (Host & Martinand, 1975 ; Giordan, 1978 ; Charpak, Lena & Quéré, 2005), recours à l'histoire des sciences (Giordan *et al*., 1986/87 ; Hosson & Kaminski, 2007 ; Mathe, Meheut & Hosson, 2008), irruption de l'ordinateur dans le champ éducatif et émergence des TICE (Chaptal, 2003 ; Compas, 2007)…

La formation professionnelle a suivi ce mouvement, proposant des réflexions sur le travail individuel ou collaboratif aussi spécifiques et variées que le sont ses différentes branches et qualifications, des enseignants aux ingénieurs en passant par les techniciens, les sportifs, les banquiers ou les médecins. A cet égard, la formation à la santé s'adresse depuis peu aussi bien aux patients, désireux de prendre en main leur maladie et leurs traitements, qu'aux professionnels qui les encadrent (Golay, Lagger & Giordan, 2007, 2009).

Parallèlement, les sociétés et communautés savantes ont multiplié les initiatives pour rapprocher la science et la société, « instruire le grand public », le rallier à leurs causes et attirer des étudiants (Marquet, 2002). Des musées scientifiques (Van Praët, 1989 ; Guichard, 1993 ; Caillet, 1995 ; Giordan, 1996a ; Deferne, 1996 ; Le Marec, 1998) aux bars des sciences (Gaaloul, 2007), des blogs scientifiques (Blanchard, 2011) au théâtre de science (Bunico 1989 ; Jacques & Raichvarg 1991 ; Raichvarg, 1993 ; Collet, Eastes & Faury, 2009), une multitude de formes de médiation scientifique ont été imaginées (Eastes, 2004, 2011d), constituant autant de nouvelles approches pédagogiques.

Quant aux services de communication scientifique des grands groupes industriels et des instituts de recherche, ils ont vu croître leurs besoins d'informer et de convaincre un grand public pas toujours acquis à leur cause, au sein de complexes relations corps-nature-science-technologie-industrie-société. La rhétorique a été réinventée (This *in* Pellaud, 2004), les techniques de marketing (viral ou non) venant enrichir des moyens de communication et de diffusion des informations (voire de manipulation : Joule, 2002) toujours plus performants (Kapferer, 1983 ; Morgensztern, 1983).

Dans cette grande diversité de pratiques, la question de la réception de l'information, de l'élaboration de la pensée et de la construction des savoirs scientifiques se pose de manière récurrente et, souvent, la pratique ne suffit pas pour surmonter les obstacles pédagogiques qui s'y rencontrent (Eastes & Pellaud, 2004b). C'est ainsi que le recours à des approches théoriques conjuguées à l'expérimentation pédagogique peut bénéficier à l'éducateur, au formateur, au médiateur ou au communiquant (Giordan, 1987 ; Giordan, 1996a).

Or les dernières décennies se sont révélées tout aussi prolifiques du point de vue théorique que pratique. Les théories éducatives ont d'abord pu bénéficier des apports majeurs de la psychologie génétique (Piaget, 1966, 1969 ; Ausubel, 1968 ; Bruner, 1986) puis, conjuguées aux apports de l'épistémologie (Bachelard, 1934, 1938 ; Canguilhem, 1968), elles ont conduit au développement de la didactique des sciences (Giordan, 1987, 1998 ; Martinand, 1986), avant la percée majeure des neurosciences dont un pan entier a commencé à se préoccuper des différents types d'apprentissages (modèles d'acquisition de la lecture et du calcul par exemple : Dehaene, 1996, 2007), éventuellement en recourant à l'imagerie cérébrale (Houdé, 2004). Souvent au sein d'une fédération de disciplines qualifiée de *sciences cognitives*, et en lien avec la philosophie de l'esprit (Andler, 2004), diverses théories sont nées des travaux des logiciens (révision des croyances : Gärdenfors, 1992), des économistes (finance comportementale : Tversky & Kahneman, 1974), des anthropologues (évolution culturelle : Sperber & Hirschfeld, 1999, 2004) et des linguistes (linguistique générative : Chomsky, 1979, 2005), toutes conduisant à des modélisations et des compréhensions plus fines du fonctionnement de la pensée.

Pourtant, il ne semble pas aujourd'hui exister d'approche théorique applicable à tous les niveaux d'apprentissages complexes (c'est-à-dire qui ne serait pas uniquement applicable au langage, à la lecture ou à la prise de décision), qui soit à la fois formalisée et fondée sur la pratique pédagogique, et surtout intelligible pour le praticien. Il manque essentiellement, entre ces approches académiques, des références et des cadres théoriques communs, les diverses communautés de chercheurs (psychologues, didacticiens, cognitivistes, philosophes…) étant encore relativement disjointes, et surtout éloignées des pratiques.

En organisant leur convergence dans le paradigme des *théories du changement conceptuel* (Posner, Strike, Hewson & Gertzog, 1982), ce travail de recherche s'emploie à (ré)concilier ces différentes conceptions théoriques sur l'apprendre et à les rendre opératoires pour l'ensemble des praticiens concernés par les apprentissages complexes, notamment à travers la création d'outils et de ressources pour les enseignants et les communicants. Cherchant à établir un pont théorique et pratique entre les sciences de l'éducation (et notamment la didactique), les sciences cognitives, l'épistémologie, l'histoire et la philosophie des sciences, la thèse se propose notamment de reformuler un modèle didactique à l'interface entre ces disciplines : le *modèle allostérique de l'apprendre*, initié par Giordan (1988).

Dans la partie *2. Etat de la question*, nous commencerons par étudier les différents courants théoriques qui ont contribué à décrire les processus d'apprentissage, en prenant soin de redéfinir précisément un certain nombre de termes, et notamment l'acception scientifique de la notion de *modèle*. Plus précisément, la partie *3. Cadre théorique et pratique* aura pour objectif de décrire les apports particuliers et les limites des trois approches complémentaires sur lesquelles s'appuiera ensuite notre recherche : les *théories du changement conceptuel*, le *modèle allostérique* de Giordan et les *sciences cognitives* appliquées à l'éducation. Nous y développerons en particulier les travaux récents des psychologues cognitifs sur les processus d'apprentissage tels que les théories du *recyclage neuronal* (Dehaene, 2007) ou de l'*inhibition cérébrale* (Houdé & Tzourio-Mazoyer, 2003), ainsi que diverses théories relatives à l'élaboration de la pensée telles que celle des *heuristiques* et des *biais cognitifs* (Tversky & Kahneman, 1982) ou le *modèle-cadre SRK* (Rasmussen, 1990).

Dans la partie *4. Problématique*, nous montrerons alors les limites des approches existantes et l'intérêt qu'il y aurait à développer le concept d'*allostérie* à travers une plus grande formalisation des processus de déconstruction-reconstruction des *conceptions* qui ont lieu lors des apprentissages complexes. Nous appuyant sur la description du formalisme de la réactivité chimique, nous émettrons l'hypothèse (1) qu'il est possible d'exploiter ses outils théoriques pour enrichir le modèle allostérique et le rendre non seulement explicatif mais également prédictif, tant du point de vue des processus d'apprentissage que du traitement cognitif de l'information, à condition de bien préciser les termes et les limites de l'analogie. Nous suggérerons alors (2) que notre approche est susceptible de constituer une source d'innovations pédagogiques à travers la prescription d'*environnements didactiques* directement dérivés du modèle, définissant une *approche pédagogique allostérique*. Mais pour pouvoir exploiter ce modèle allostérique formalisé, nous proposerons une procédure consistant en sa validation expérimentale (3) à travers la mise à l'épreuve de certaines de ses prédictions théoriques, et en particulier de celles qui portent sur les intérêts, limites et usages de l'expérience contre-intuitive. Ces trois temps conduiront à la formulation de nos trois hypothèses de recherche. La partie *5.* suivante décrira alors la *méthodologie* sur laquelle repose l'ensemble de notre recherche.

La partie théorique *6. Formalisation du modèle allostérique* constitue le cœur véritable de notre travail, et corrobore notre première hypothèse de recherche. Elle développe, dans le cadre théorique prédéfini, la description formelle de l'ensemble des processus cognitifs liés aux apprentissages complexes : traitement de l'information, chemins de pensée, transformations du savoir et stabilisation des conceptions, contrôles péricognitifs… Autant de notions nouvelles qui viendront éclairer la compréhension de la pensée, de l'élaboration des savoirs et, plus généralement, des compétences.

De la phase précédente de théorisation du modèle, effectuée par un recours au formalisme de la réactivité chimique en accord avec la métaphore initiale de l'allostérie, on s'efforcera alors de déduire divers outils pédagogiques et environnements didactiques, opératoires et féconds pour le praticien de l'enseignement et de la communication des sciences. C'est ce qui fait l'objet de la partie *7. Prévisions du modèle : implications et applications pédagogiques*, qui corrobore la deuxième hypothèse de recherche et qui permet par ailleurs de montrer que ledit modèle est capable d'éclairer en retour des activités pédagogiques existantes, c'est-à-dire d'en expliciter les succès et les limites, voire d'en proposer des perfectionnements.

La partie *8. Partie expérimentale : mise à l'épreuve du modèle allostérique formalisé*, consiste pour sa part en la mise en œuvre de la recherche de terrain destinée à valider le modèle autrement que par l'adéquation de ses prédictions théoriques avec la littérature. En appliquant le modèle nouvellement conçu à la notion d'*expérience contre-intuitive*, nous en déduirons un certain nombre de caractéristiques qui devraient être observées lors de sa mise en œuvre, et qui constituent une large palette de prédictions. Ces dernières seront alors mises à l'épreuve expérimentalement pour corroborer notre troisième hypothèse de recherche.

L'ensemble de ce travail débouchera alors sur des *applications* originales et des *perspectives* fécondes (partie *9*), tant sur le plan de l'enseignement et de la vulgarisation que de la médiation scientifique et de la communication institutionnelle.

2. ETAT DE LA QUESTION

« Apprendre par coeur ; ce mot me plaît. Il n'y a guère en effet que le coeur qui retienne bien, et qui retienne vite. »
Marie-Jean Hérault de Séchelles (1759-1794), homme politique français.

2.1. Pédagogie, modèles didactiques et apprentissage

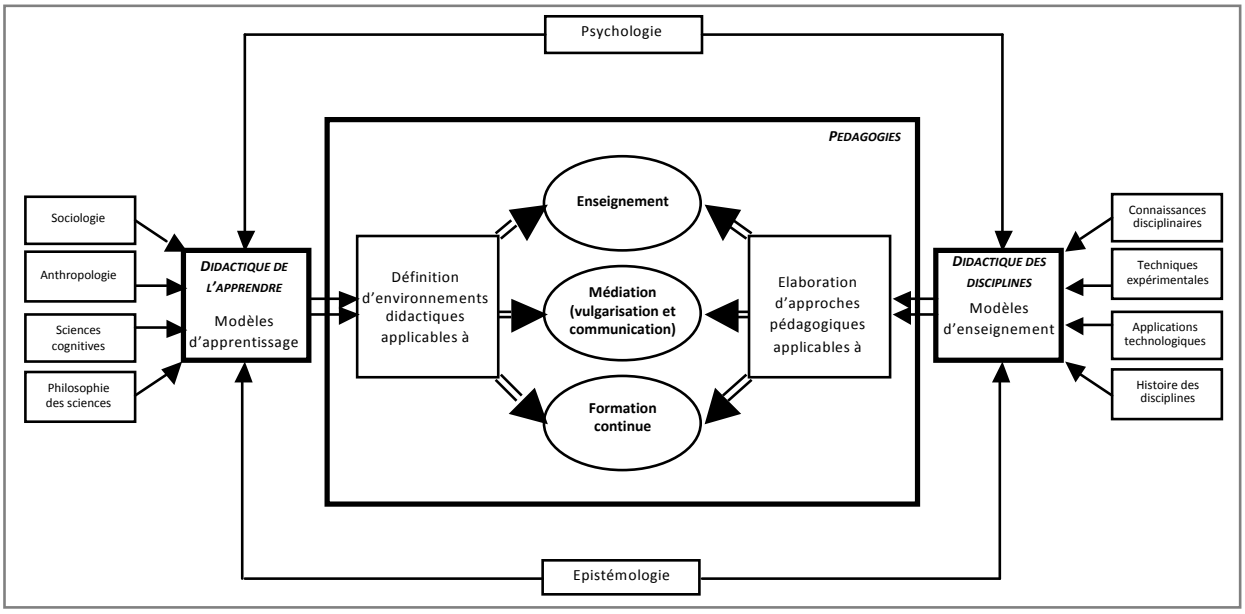
2.1.1. Délimitation de l'étude

Rappelons pour commencer la préoccupation simple et générale d'où part notre étude : tenter d'enrichir les pratiques d'enseignement et de médiation scientifiques par une approche théorique opératoire, féconde et intelligible pour les praticiens (Eastes & Pellaud, 2004e). Or pour passer de cet objectif large à ce qui constituera plus spécifiquement le cœur de notre travail, à savoir *le développement, la formalisation et la validation expérimentale d'une modèle d'apprentissage conçu à partir du modèle allostérique de l'apprendre dans le cadre des théories du changement conceptuel*, plusieurs choix doivent être justifiés.

Le premier consiste à adopter le point de vue de la didactique des apprentissages, que nous considérons en quelque sorte comme relevant d'une démarche miroir de celle de la didactique des disciplines. Considérant que les progrès les plus sensibles sont susceptibles d'être réalisés au niveau de problématiques centrées sur l'individu apprenant plutôt que sur le message délivré par l'éducateur, nous nous concentrerons donc non pas sur l'acte d'enseigner mais sur l'acte « d'apprendre » (Giordan, 2004), considérant que le premier se nourrit (entre autres) de la compréhension du second. Nous ferons dès lors uniquement porter notre regard sur l'ensemble des facteurs qui contribuent à faciliter toute forme d'élaboration d'un savoir nouveau par un individu (« l'apprenant »), quel qu'il soit et où qu'il soit. En accord avec Giordan (2004), nous nommerons ce processus « l'apprendre », non sans employer occasionnellement le terme d'apprentissage ou de « processus d'apprentissage », plus familiers aux sciences cognitives. Cette approche est visualisable sur la partie gauche de la figure 1 (publiée dans Giordan, 2004), où didactique de l'apprendre et didactique des disciplines s'appuient respectivement sur les modèles d'apprentissage et sur les modèles d'enseignement. Elles alimentent les pédagogies et toutes les situations éducatives.

Le second choix, presque préalable au premier, consiste à préférer partir de l'approche de la didactique et à la compléter par celle des sciences cognitives pour réaliser notre projet, plutôt que l'inverse. Ce choix sera davantage justifié après avoir fait l'état de la question, en début de problématique, sur la base de la description des modèles correspondants. On peut toutefois d'ores et déjà mentionner qu'avec les sciences de la cognition, par rapport à l'approche didactique, le problème est en quelque sorte abordé « par l'autre bout du tunnel ».

La plupart des recherches en psychologie cognitive, par exemple, s'effectuent en laboratoire et ont pour principal objet d'étude le cerveau humain, sa structure, ses mécanismes, sa plasticité, ses dysfonctionnements ; elles s'effectuent de ce fait souvent sur des nourrissons, des malades ou des individus cérébro-lésés. Une partie restreinte seulement de leurs résultats peut être appliquée à l'éducation et, lorsque les recherches se font dans une perspective d'amélioration des pratiques éducatives, elles portent surtout sur les apprentissages fondamentaux tels que la lecture, l'écriture ou le calcul. A l'inverse il est vrai, les recherches des didacticiens sont presque exclusivement consacrées aux élèves et individus sains en situation réelle en classe, c'est-à-dire hors du laboratoire, où la diversité des facteurs est tellement grande qu'elle en est non maîtrisable, sinon sur des études statistiques géantes de type PISA, mais où elle est si déterminante pour un élève donné que tous doivent être pris en considération.



Eastes - Pellaud - Giordan, 2004

: alimente
: produit
: s'applique à

Figure 1 : Articulations entre didactiques et pédagogie.

Entre didactique de l'apprendre et sciences cognitives, une troisième voie est possible : celle de la philosophie des sciences qui, par certains de ses travaux, tente de produire des modèles de la pensée. Hormis les modèles fondés sur la logique, la plupart d'entre eux sont plus phénoménologiques[1], et donc plus généraux, que ceux des sciences cognitives dures. Or en tant que descriptions de la manière dont l'individu pense, ils sont susceptibles de servir le dessein de la didactique de l'apprendre, en nourrissant la réflexion sur les processus d'apprentissage par la compréhension de la manière dont les individus se représentent, élaborent, transforment et communiquent leur savoir, individuellement et collectivement.

Ces diverses considérations justifient d'une part le choix de la didactique de l'apprendre comme point de départ et comme cadre théorique et expérimental, mais elles incitent également à une recherche de convergence entre didactique, sciences cognitives et philosophie des sciences, dans la perspective de conjuguer les efforts déployés pour comprendre le fonctionnement de l'esprit humain. C'est ce que nous tenterons de faire, notamment en reconnectant le modèle allostérique de l'apprendre avec les modèles issus de ces autres disciplines, soit en nous en servant pour l'enrichir, soit en l'évaluant à l'aune de leurs propres descriptions et prévisions.

Ce sont également ces perspectives qui permettent de délimiter l'état de la question en le circonscrivant aux théories éducatives, aux modèles d'apprentissage et aux théories de la pensée.

2.1.2. Définitions

Dans toute la suite, lorsque nous parlerons d'éducation formelle, nous utiliserons les termes « éducatif », « scolaire » et « pédagogique » en fonction des niveaux de description qu'ils représentent. Un peu à la manière de poupées gigognes, nous considérerons que l'*éducation* dépasse le cadre *scolaire* (restreint à la question de l'éducation, voire de l'instruction à l'école), la *pédagogie* s'inscrivant pour sa part à un niveau inférieur (notamment parce qu'elle doit *s'adapter* aux contraintes scolaires). Pour ce qui concerne l'éducation informelle, nous nous autoriserons également à parler de pédagogie ; le niveau intermédiaire entre *éducation* et *pédagogie* ne sera alors plus scolaire mais muséographique, éditorial, médiationnel, etc.

1 Ce terme sera défini au paragraphe *2.1.3.2. Les modèles phénoménologiques*.

Dans toute la suite, nous emploierons relativement indifféremment les substantifs « apprendre » et « apprentissage ». Lorsque nous utiliserons le premier, ce sera toujours pour signifier son emploi dans le cadre de la didactique (qui l'introduisit pour éviter la confusion avec les « filières d'apprentissage »). L'expression « processus d'apprentissage » sera quant à elle le plus souvent employée pour insister sur les mécanismes mentaux ou cérébraux mis en œuvre.

Contrairement aux autres langues qui distinguent par des mots différents le fait d'acquérir des connaissances ou des compétences (to learn (*angl.*), lernen (*all.*), imparare (*it.*), aprender (*esp.*)) et de les enseigner (to teach (*angl.*), lehren (*all.*), insegnare (*it.*), enseñar (*esp.*)), le français autorise l'emploi du terme « apprendre » pour désigner les deux actions (on *apprend* à lire l'heure à ses enfants qui, ce faisant, *apprennent* à lire l'heure). Dans toute la suite, nous conserverons au terme « apprendre » la première des deux acceptions ; « l'acte d'apprendre » sera ainsi toujours distinct de « l'acte d'enseigner ».

2.1.3. La notion de modèle en didactique de l'apprendre

Parce qu'ils mettent en œuvre des phénomènes descriptibles à des niveaux aussi bien linguistiques et neurophysiologiques que psychologiques et émotionnels, les processus d'apprentissage apparaissent comme extrêmement complexes et multiformes. Et comme c'est le cas de tout processus complexe, leur compréhension nécessite une théorisation qui, en isolant les paramètres les plus significatifs et en les articulant par des lois (conceptualisation et modélisation), fournit, dans des domaines d'application donnés, des clefs de compréhension, de prédiction et d'application.

2.1.3.1. Les modèles didactiques en tant que modèles scientifiques

A travers ses multiples disciplines, la science s'est toujours et avant tout efforcée de rationaliser les phénomènes, c'est-à-dire de les catégoriser, de les nommer, de les relier mais surtout de les « modéliser ». On entend par là :

- la définition d'outils linguistiques et théoriques nommés *concepts disciplinaires*, définis aussi précisément que possible et faisant correspondre un terme à une classe d'objets ou de phénomènes (exemples : molécule, gène, masse, entropie…) ;
- l'attribution à ces concepts de *propriétés* intrinsèques et reproductibles, souvent idéalisées, parfois traduites par des *grandeurs* mathématiques qui rendent compte de ces propriétés (cas de la masse *m* et de l'entropie *S* dans les exemples ci-dessus ; on parle alors de *formalisation*) ;
- la *mise en relation* de ces propriétés, qui se traduit par des *règles*, des *principes* ou des *lois*, éventuellement mathématiques (règle de l'octet, 2nd principe de la thermodynamique, loi de Hooke…) ;
- la *hiérarchisation* de ces relations au sein d'un *système* théorique cohérent, qui conduit à la définition du *domaine d'application* du modèle et donc de ses *limites* (modèle de Lewis ou théorie des orbitales moléculaires, mécanique classique ou lagrangienne, relativité restreinte ou générale).

Ainsi le processus de modélisation s'appuie bien évidemment sur l'observation des phénomènes, mais il est en général restreint à des situations idéalisées, définies par des domaines d'application particuliers. Et justement parce qu'ils ont été conçus pour simplifier des situations complexes, les modèles peuvent être totalement inopérants en dehors de leurs domaines d'application[2]. Notons en outre que, même dans leurs domaines d'application, ils sont souvent approximatifs et qu'il convient lors de leur utilisation, non seulement de garder à l'esprit les limites de leur validité mais également leur degré de précision[3].

---

[2] C'est par exemple le cas de l'expression classique de l'énergie cinétique ($E_c = ½ mv^2$) lorsque la vitesse de l'objet considéré n'est plus négligeable devant celle de la lumière. Dans ce cas, les modèles de la mécanique classique ne sont plus valables et il est nécessaire d'invoquer ceux de la mécanique relativiste.

[3] Considérons par exemple le modèle de Bohr de l'atome, convenable pour décrire les transitions électroniques de l'atome

Ce processus de modélisation n'est pas propre qu'aux sciences formelles et il est transposable à de nombreux autres domaines. On construira ainsi des modèles *numériques* actionnés par des algorithmes, tels que les modèles météorologiques ou climatiques dont les domaines d'applications sont totalement distincts en termes de durées et d'échéances, des modèles *iconiques* tels que la représentation du développement durable de la figure 2a, des *modèles-objets* qui permettent en général la manipulation physique et les changements d'échelle (figures 2b et 2c), voire des modèles *pédagogiques*, inexacts au regard des connaissances scientifiques validées mais opératoires pour l'apprenant à un certain stade de son évolution (Giordan, 1991). Ces modèles peuvent être *descriptifs* (comme c'est le cas de la plupart des modèles en sciences physiques), *prédictifs* (c'est le cas de tous les modèles de simulation numérique) ou *programmatiques* (ainsi en va-t-il du développement durable).

Figure 2 : a/ Développement durable, b/ modèles moléculaires, c/ mappemonde… Autant de types de « modèles » différents décrivant des comportements idéalisés et utilisant des représentations simplifiées.

2.1.3.2. Les modèles phénoménologiques

Dans la suite, nous emploierons régulièrement l'expression de « modèle phénoménologique ». Ce qualificatif ne doit pas être confondu avec le courant philosophique du même nom, même si les deux acceptions ont des origines communes. Par *modèles phénoménologiques*, nous désignerons les élaborations théoriques qui s'appuient presque exclusivement sur des phénomènes observables, et non sur la caractérisation de leurs causes. L'interprétation qu'ils donnent de ces phénomènes est alors fondée sur des concepts qui ne représentent pas nécessairement des paramètres observables dans la réalité. Autrement dit, le modèle phénoménologique décrit la réalité, mais en s'appuyant sur des notions qui n'appartiennent pas nécessairement à cette réalité : lorsqu'on les utilise, on peut alors dire « tout se passe comme si… ». C'est le cas de la plupart des modèles d'apprentissage formulés par les sciences de l'éducation, qui ont produit des concepts tels que la zone proximale de développement, les p-prims, les schèmes de pensée, les représentations, et que nous décrirons plus loin.

Beaucoup d'approches scientifiques expérimentales sont d'abord phénoménologiques avant d'être déterministes. Ainsi, la description des mouvements des planètes était phénoménologique lorsqu'elle s'appuyait sur l'existence d'une voûte céleste ; elle a cessé de l'être lorsqu'ont été comprises les causes de ces mouvements. La médecine l'a été avec la théorie des humeurs, et l'acupuncture l'est encore quant elle s'appuie sur des méridiens d'énergie inobservables. La théorie des cordes, dans une certaine mesure, l'est également, parce qu'elle s'appuie sur des objets hypothétiques. On pense alors immédiatement au boson de Higgs : la physique des particules reste partiellement phénoménologique bien que les observations des physiciens la rendent de plus en plus déterministe. La chimie en relève souvent aussi lorsqu'elle se fonde sur des notions telles que l'état de transition ou l'aromaticité, mais elle l'a été bien davantage par le passé, au moment de la création de la classification périodique par exemple.

---

d'hydrogène, mais très insuffisant pour décrire la couleur de la chlorophylle…

L'approche phénoménologique n'est donc pas réservée aux sciences humaines, où on l'attendrait davantage. Et pour ne pas être déterministe, elle n'en demeure pas moins opératoire et féconde. *Opératoire* car, en s'appuyant sur les phénomènes observables, elle reste très proches d'eux ; c'est le cas de l'ensemble des modèles de l'apprendre produits par les sciences de l'éducation, tant qu'ils ne se fondent pas sur des observations d'imagerie. *Féconde* car, en imaginant des concepts tels que les cordes, les méridiens, les états de transition ou les éléments chimiques, elle force tout de même les scientifiques (ou les philosophes) à s'interroger sur la véritable nature de ces concepts, à retourner vers la nature pour l'interroger, en imaginant des expériences destinées à les caractériser en les rendant observables. Ainsi la notion de *qualia* appartient-elle depuis longtemps à la philosophie de l'esprit, qui l'emploie pour désigner les expériences perceptives et émotionnelles, et les sciences cognitives s'intéressent-elles à caractériser les états mentaux qui peuvent leur être reliés.

Dans un deuxième temps, pour devenir *déterministe*, l'approche doit souvent se rendre préalablement *réductionniste*. Ainsi en fut-il des sciences de la vie et de la matière, à tel point que leur enseignement même ne se conçoit plus autrement que fondé sur la compréhension préalable des particules élémentaires, atomes, molécules et autres gènes. Nous verrons pourtant, à la toute fin de cette étude, combien l'approche phénoménologique, pour des sciences expérimentales devenues déterministes, peut être riche d'un point de vue pédagogique.

Remarquons pour finir, dans le cadre de cette distinction entre approches phénoménologiques et déterministes, que non seulement les modèles scientifiques relevant de la première peuvent être théoriques, mais qu'ils peuvent également être formels. A cet égard, le modèle allostérique de l'apprendre que nous décrirons plus loin et qui constituera l'objet principal de cette étude, pourra être considéré comme théorique et phénoménologique. Et à l'instar de ce que font les sciences cognitives à l'égard de la philosophie de l'esprit, notre travail consistera alors à le formaliser puis à le rendre déterministe en tentant de comprendre, notamment grâce aux sciences cognitives, la nature des concepts de base sur lesquels il est fondé : les conceptions.

2.1.3.3. Transposition aux modèles didactiques

Dans toute la suite de cette étude, c'est dans son acception scientifique telle qu'elle a été définie ci-dessus que nous utiliserons l'expression « modèles de l'apprendre ». Conçus pour un type particulier de situations d'apprentissage, ces modèles ont pour objectif d'en expliciter les processus en s'appuyant sur leurs caractéristiques principales. Véritables « reconstructions », simplifiées mais opératoires, d'une réalité observée sous un cadre théorique et avec une approche expérimentale donnés, ils ne s'appliquent que dans des conditions précises et délimitées. Fondés sur des paramètres bien définis et articulés par des comportements identifiés comme des lois généralisables ou érigés en principes, ils possèdent enfin, comme tous les modèles scientifiques, un double rôle *interprétatif* et *prédictif* qui consiste à la fois à comprendre, à expliciter et à imaginer des applications.

Quelles peuvent-être les applications d'un modèle de l'apprendre ? Tout simplement l'explicitation d'observations en situations d'enseignement et la génération d'une *pédagogie*, fondée sur les paramètres et les principes mis en valeur par le modèle. On prendra toutefois garde à ne pas confondre les deux, ce qui reviendrait à confondre apprendre et enseigner (Giordan, 1994). Dans ce cadre, on évitera de considérer qu'un modèle de l'apprendre puisse être programmatique : ce sont ses applications seules qui pourront définir un cadre programmatique pour l'enseignement.

Dans son acception scientifique, le modèle de l'apprendre ne constitue donc jamais une « méthode », un idéal à atteindre ou un exemple à suivre (qui constituent il est vrai d'autres définitions du terme « modèle » dans le langage courant), ce qui reviendrait à le confondre avec ses applications. La confusion est pourtant possible, comme lorsque Joyce, Weil & Calhoun (2003) écrivent : « *A model of teaching is a description of a learning environment, including our behavior as teachers when that*

model is used. These models have many uses, ranging from planning lessons and curriculums to designing instructional materials, including multimedia programs ».

Le type de modèle dont il est question ici relève des « modèles d'enseignement », qui s'apparentent plus à des ensembles cohérents de recommandations pédagogiques qu'à de véritables modèles, au sens scientifique du terme. Une difficulté terminologique qui nécessite quelques considérations supplémentaires.

2.1.3.4. Théories éducatives et modèles d'enseignement

En matière d'éducation comme de médecine, le régime de production des connaissances le plus pertinent n'a pas toujours été exclusivement celui qui adoptait une démarche expérimentale et scientifique. En dépit de l'émergence des « sciences » de l'éducation, bien des principes et axiomes hérités des pédagogues les plus célèbres n'ont pas été prouvés scientifiquement, sans pour autant qu'ils soient faux.

Il existe en effet des régimes de production de connaissances alternatifs à la science, dont la légitimité se fonde sur d'autres normes et d'autres valeurs, et dont certains sont susceptibles d'être appliqués avec une relative pertinence à des sujets aussi complexes que l'éducation ou la santé, en l'absence de moyens scientifiques réellement puissants, comme ce fut le cas jusqu'à nos jours pour ce qui concerne l'éducation.

A partir du travail du sociologue Lagrange, et avec l'aide de Cadic, nous avons en l'occurrence défini cinq régimes de production de connaissances, dont seul le premier s'apparente à la production scientifique (tableau 1) (Eastes *in* Traces, 2011). Tous les autres sont crédibles pour de larges ensembles de personnes, sans s'exclure les uns les autres : on peut être scientifique et croire en Dieu, se soigner avec des antibiotiques et à l'homéopathie…

Régime de production	**Construit**	**Traditionnel**	**Immanent**	**Militant**	**Performatif**
Modalité de production	Je crée des réseaux	Je transmets	Je me transforme	Je prouve	Je guéris
Ce qui est vrai c'est…	ce que le réseau a établi.	ce qui était vrai avant.	ce que le prophète (ou le gourou) a dit.	ce que nous avons révélé.	ce que nous provoquons.
Ce n'est pas faux parce que…	le réseau l'a validé.	on le saurait depuis longtemps.	on ne peut pas mettre sa parole en doute.	on veut nous le cacher.	ça marche.
Exemples de pratiques	La science	La cosmogonie Dogon	Le christianisme	L'ufologie	L'homéopathie, l'astrologie

Tableau 1 : Différents régimes de production de connaissances et caractéristiques principales.

Or la production de connaissances sur l'éducation, comme en médecine avec notamment la longue tradition des médecines dites « alternatives », a souvent procédé (et procède encore) du régime *performatif*, c'est-à-dire suivant un raisonnement du type « *Ca marche, donc c'est ainsi qu'il faut procéder* ». On ne peut nier qu'elle suive également de temps en temps les autres régimes, mais ces cas particuliers ne nous intéresseront pas ici, bien qu'il serait amusant de les décrypter.

C'est ainsi que dans bien des cas, des pédagogues particulièrement inspirés ont pu décider de mettre en mots leur approche pédagogique, de la décrire à l'aide de concepts nouveaux et d'articulations pertinentes, construisant de ce fait des « modèles pédagogiques », voire bâtissant des « théories éducatives » complètes. Autant d'écrits et de pratiques que nous évoquerons plus loin.

Toutefois, de plus en plus de connaissances en matière d'éducation sont susceptibles de provenir des sciences cognitives qui, pour leur part, relèvent bien du régime « construit ». L'analogie entre éducation et médecine est une fois encore particulièrement pertinente si l'on se réfère à la conception de Bruer (1993), selon laquelle les sciences cognitives entretiennent avec l'éducation le même rapport que la biologie avec la médecine. Cette comparaison, qu'Andler nomme « équation de Bruer », fixe à la fois la portée et les limites des sciences cognitives en la matière, soulignant en particulier combien la médecine ne peut être réduite à la biologie, compte tenu de « *la distance séparant la science de la pratique, d'autant plus grande que la pratique en question est massivement collective et insérée à de multiples niveaux dans la politique, l'économie, la culture et les normes* » (Andler, 2008).

Que deviennent alors la didactique et les sciences de l'éducation traditionnelles, dans le cadre de cette *équation* ? Comparées au registre de la médecine, nous pensons qu'elles peuvent être rapprochées de l'épidémiologie, cherchant à collecter des idées générales sur l'éducation, des mesures et propositions en matière de santé publique (notamment à travers la réflexion sur le rôle de l'école), de la réflexion sur les pratiques médicales (qui constituent alors le pendant de la réflexion sur les outils pédagogiques), voire de l'approche psychologique de l'action thérapeutique. Leurs outils ne sont pas ceux de la médecine technologique - ceux-là seront l'apanage des sciences cognitives - mais bien plutôt les petits instruments du médecin généraliste : thermomètre, stéthoscope, tensiomètre… voire parfois du spécialiste pour les branches spécialisées de la didactique. De même, leurs théories sont plutôt intuitives, émanant de la pratique et de la compréhension directe du terrain.

Dans la suite, nous parlerons de *pédagogie théorisée* pour désigner cette approche qui, en des termes épistémologiques, pourrait être qualifiée d'*inductive*. Mais ce sont bien des « modèles d'enseignement », et non des modèles d'apprentissage, qui résultent le plus souvent de cette approche déductive. Et quand bien même ils sont nourris de réflexions sur la manière d'apprendre des élèves, nombre d'entre eux ne peuvent se prévaloir de l'acception scientifique du terme.

2.1.4. Rôles et usages des modèles de l'apprendre

2.1.4.1. Modèles d'apprentissage explicites et implicites

Ces considérations conduisent à distinguer les modèles que nous qualifierons d'« explicites » et d'« implicites ». Les *modèles explicites* sont ceux qui formalisent les manières d'apprendre et les processus d'apprentissage. De leur élaboration théorique naissent des applications qui sont notamment, puisqu'il s'agit d'apprentissage, d'ordre pédagogique. Ceux des sciences de l'éducation sont phénoménologiques, ceux des sciences cognitives sont déterministes.

A l'inverse, les *modèles implicites* sont ceux qui sous-tendent, souvent inconsciemment, les pédagogies intuitives et empiriques, c'est-à-dire non déduites directement des modèles théoriques mentionnés ci-dessus. Ils constituent à la fois les paradigmes pédagogiques qui déterminent les méthodes pédagogiques déployées par l'enseignant et ses « représentations naïves » sur l'apprentissage, qui l'influencent dans sa manière d'enseigner sans nécessairement qu'il s'en rende compte.

Or la « théorisation pédagogique » que nous évoquions plus haut a tout de même conduit certains pédagogues à formaliser les modèles de l'apprendre implicites qui sous-tendaient leurs pratiques empiriques, et à bâtir sur cette base des modèles d'apprentissage « explicités ». Fondés sur de larges expériences et une grande intuition héritée d'une longue pratique, ils ont pu conduire à la formulation de connaissances pertinentes, comme nous le verrons plus loin.

Mais cette approche est aujourd'hui relativement contestée pour son manque de rigueur scientifique, ce qui conduit même certains chercheurs en sciences cognitives à qualifier les modèles ainsi formulés de « modèles pré-scientifiques » (Ramus, 2008). De leur côté en effet, les sciences cognitives peuvent se permettre de viser un degré de scientificité bien plus grand dans ce champ d'étude, grâce aux synergies établies par la fédération et la convergence de disciplines aussi diverses que la philosophie, la linguistique, l'intelligence artificielle, la psychologie et la neurobiologie, mais aussi grâce aux lourds

moyens financiers dont elles disposent, permettant notamment la mise en place de puissantes techniques expérimentales telles que l'imagerie par résonnance magnétique ou l'eye-tracking, et grâce enfin à un cadre théorique et des paradigmes expérimentaux très structurés (Andler, 2004). Et en effet, elles tentent à présent de construire des modèles théoriques explicites *préalables*, certes fondés sur l'observation, mais selon des méthodes expérimentales performantes, et bien que leur champ d'investigation reste encore relativement étroit.

Le risque est cette fois de voir apparaître des résultats théoriques déconnectés des réalités de la classe et de la société, tant l'étude du cerveau d'un élève ne saurait permettre de comprendre le comportement global de ce dernier lorsqu'il est placé dans ses multiples environnements scolaires, familiaux, politiques ou religieux. C'est pourquoi l'approche la plus pertinente consiste probablement en une collaboration étroite entre chercheurs en sciences cognitives, didacticiens et pédagogues, les uns apportant leur rigueur théorique et expérimentale au profit des autres, véritables spécialistes de l'éducation. Le dialogue peut alors passer dans un autre régime : celui de l'*evidence based education* (éducation fondée sur la preuve) (Kirsch, 2008). Andler (2008) écrit ainsi : « *Chacun – et c'est heureux – a sa petite idée sur l'éducation, comme on en a sur les accidents de la route, sur la baisse de la natalité ou sur l'économie. Mais ces idées sont généralement peu robustes, souvent contradictoires, et s'effritent souvent dans la confrontation. Pour les dépasser, nous devons, sans oublier nos humanités, nous mettre à l'école des sciences et nous soumettre à la discipline de l'expérience* ». La recherche de Dweck sur les théories naïves de l'intelligence, évoquée au paragraphe *3.4.2.3. Niveaux de contribution et d'implications*, illustrera ce point de manière particulièrement pertinente.

2.1.4.2. La dialectique cognition appliquée - pédagogie théorisée

Considérant les deux rôles (prédictif et interprétatif) des modèles de l'apprendre, il existe au moins trois manières bien distinctes d'en concevoir l'usage. La première, par opposition à l'approche inductive mentionnée plus haut, sera qualifiée de *déductive* : elle consiste à considérer un modèle théorique explicite, élaboré par un protocole expérimental rigoureux en laboratoire, voire corroboré par des clichés d'imagerie cérébrale, et à en déduire des instructions pour la pratique : on parlera de didactique (ou de cognition) appliquée. C'est ce qui se produit par exemple lorsqu'on se fonde sur un modèle cognitif de la lecture tel que celui développé par le *Laboratoire de Sciences Cognitives et Psycholinguistique* de l'Ecole normale supérieure à Paris (Christophe, 2008), pour en préconiser une approche syllabique pour les mauvais lecteurs et une approche globale pour les bons lecteurs, comme nous le verrons dans le paragraphe *3.4.4.2. Les mécanismes de la lecture*.

La seconde approche, variante de la première, consiste à observer une situation de médiation ou d'enseignement quelconque, et à se demander par lequel des modèles explicites à disposition elle se trouve être la mieux représentée. La description dudit modèle permet alors non seulement de mieux comprendre ce qui s'y joue, mais également d'y apporter des perfectionnements éventuels.

La troisième approche se réfère aux modèles implicites des enseignants et consiste à se poser la question suivante : « *A partir de l'observation de la situation pédagogique mise en place, puis-je déduire à quel modèle explicite de l'apprendre correspond la manière implicite dont l'enseignant conçoit les processus d'apprentissage de ses élèves ?* ». Cette « manière de concevoir l'apprentissage » constitue en effet, dans ce cas, son *modèle implicite d'apprentissage*, qu'il est parfois possible de relier à un modèle explicite existant. Il devient alors possible de faire prendre conscience à l'enseignant des limites de la pédagogie associée à ce modèle, de manière à faire évoluer son modèle implicite.

A l'inverse, on ne saurait considérer un modèle explicite théorique sans faire référence à sa pertinence éducative réelle, à sa validité en situation d'apprentissage et à sa concordance avec des pratiques pédagogiques à l'efficacité avérée. Il est même probable que la plupart des modèles théoriques explicites émanent d'intuitions initiales relevant de la pédagogie théorisée, avant qu'ils ne soient formalisés et éprouvés.

Ainsi, comme c'est le cas de toute discipline scientifique, il ne devrait pas être nécessaire de faire un choix entre les approches inductive et déductive lors de l'élaboration de théories de l'apprendre. Au contraire, l'analyse de toutes les correspondances entre les modèles d'apprentissage et leurs pédagogies associées met en évidence un dialogue entre ces deux approches, seul susceptible de faire émerger les résultats les plus pertinents, grâce à des allers-retours entre la formalisation théorique et l'observation pratique.

La figure 3 illustre ces allers-retours : d'un modèle explicite peut être déduite une pédagogie générale, exprimée dans un mode pédagogique particulier qui pourra même éventuellement conduire à non plus *un* mais *une* mode. A l'inverse, une mode pédagogique quelconque, exercée dans un mode donné, pourra parfois servir de support et de point de départ à une pédagogie plus générale, caractérisée par un modèle d'apprentissage implicite chez l'enseignant qui, une fois théorisé, pourra conduire à un modèle explicite.

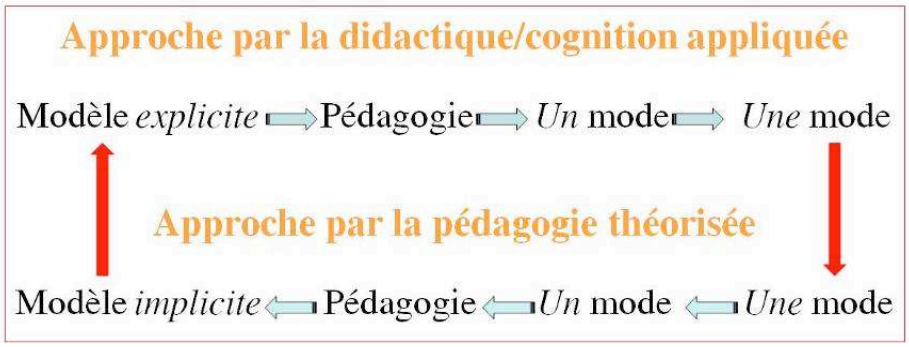


Figure 3 : Dialectique entre pédagogie théorisée et didactique/cognition appliquée.

C'est la démarche que nous nous proposons d'adopter dans cette étude, dans le cadre de la formalisation du *modèle allostérique de l'apprendre*. Dès sa conception, ce modèle s'est trouvé à l'interface entre expérimentation et théorisation, entre intuition et validation. Notre objectif consiste à prolonger cette dialectique en le formalisant pour en déduire davantage d'applications pédagogiques à travers des « environnements didactiques » détaillés tenant compte de tous les leviers de l'apprentissage, mais également à l'éprouver expérimentalement pour mieux comprendre « comment on apprend ».

2.2. Théories éducatives et modèles d'apprentissage

2.2.1. Les grandes traditions pédagogiques

2.2.1.1. Préambule

Dans l'histoire, ce lien étroit et souvent implicite entre théories éducatives, modèles d'enseignement, paradigmes de la pensée et pédagogies n'a pas conduit à l'explicitation systématique de modèles d'apprentissage tels que nous les avons définis plus haut. Au contraire, il est souvent difficile de comprendre si les écrits des pédagogues relèvent plus de la didactique appliquée ou de la pédagogie théorisée, tout comme il est difficile de distinguer les présupposés théoriques sur lesquels leurs conceptions reposent des préceptes pédagogiques qui leurs sont liés.

Notre sujet d'étude étant l'apprentissage, et le modèle que nous souhaitons développer se voulant avant tout un modèle scientifique au niveau de sa forme comme de son utilité et de sa validation, nous serions tenté de vouloir réserver les vocables de *modèle* et de *théorie* aux objets académiques qui vérifient un minimum de critères de scientificité, tels que décrits par les épistémologies de Popper (1935), Kuhn (1970) ou Lakatos (1976). Toutefois, il n'est pas possible de faire abstraction de l'emploi de ces termes dans la littérature ; c'est pourquoi, dans la suite de cette partie *2. Etat de la question*,

nous les adopterons hors de cette contrainte de scientificité lorsqu'ils auront été employés par les auteurs que nous citerons. Ce sera bien entendu le cas de la plupart des « modèles pédagogiques » et autres « modèles d'enseignement » déjà évoqués (relevant plus de « méthodes » que de véritables modèles descriptifs), mais également d'un grand nombre de courants pédagogiques que l'histoire aura requalifiés en « théories éducatives ».

En effet, si la réflexion sur l'éducation a depuis longtemps été davantage menée sous le signe de l'empirisme et de l'habitude que fondée sur de véritables preuves, elle s'est presque toujours accompagnée de réflexions sur la pensée. Que les théories éducatives reposent sur des modèles d'apprentissage explicites ou implicites, elles peuvent en général êtres reliées à un paradigme particulier en termes de conception de la nature et du fonctionnement de l'esprit humain.

Nous tenterons donc de décrire l'immense variété de ces théories éducatives en faisant ressortir autant que possible les modèles de pensée ou d'apprentissage sur lesquels elles reposent, de manière à pouvoir ensuite nous appuyer sur ces modèles pour les comparer au modèle allostérique, nous limitant aux approches qui permettent d'expliciter *a minima* ces modèles de pensée.

2.2.1.2. Une immense variété d'approches

La réflexion sur la manière dont on apprend n'est pas véritablement nouvelle. Depuis Locke (1693) et Condillac (1746) au moins, on cherche à expliquer les mécanismes mis en œuvre dans le fonctionnement de la pensée. Après les philosophes, ce furent les psychologues qui s'intéressèrent à la question, et dans leur sillage les didacticiens, les théoriciens de l'information, les neurobiologistes et les cognitivistes. Le XXe siècle fut, à cet égard, extrêmement riche ; en témoignent les multiples courants pédagogiques qui virent le jour durant cette période, expressions des différentes tentatives d'explicitation de l'apprendre.

Compte tenu de la diversité de leurs origines et la grande variété des postulats sur lesquels elles reposent, il est très difficile de faire émerger des critères simples permettant une catégorisation non équivoque des théories éducatives. Il n'est probablement pas nécessaire de rappeler que l'éducation n'est pas qu'une question d'apprentissage, et qu'à celle de la performance de l'élève s'ajoutent des problématiques d'ordres culturels, sociaux, politiques ou économiques ; ces questions ont été développées par Eastes & Pellaud (2008). Ainsi, tel auteur pourra prôner telle approche pédagogique plutôt que telle autre, non pas pour son efficacité en termes d'apprentissage mais pour la sociabilisation qu'elle permet ou les valeurs qu'elle véhicule. En outre, la variété des inspirations de ces diverses théories complique encore leur classification : psychologiques, épistémologiques, cybernétiques, cognitives, sociologiques, technologiques, voire humanistes et spiritualistes… autant d'origines s'exprimant selon des approches phénoménologiques, déterministes, expérimentales, philosophiques...

Il apparaît toutefois possible de distinguer quatre grandes traditions éducatives si l'on se concentre sur la question des apprentissages, chacune semblant s'appuyer sur un modèle d'élaboration de la pensée différent, voire sur un cadre théorique et des paradigmes pédagogiques distincts. Même si ces modèles n'y sont pas souvent formulés explicitement et même s'il existe des propositions hybrides, les frontières entre ces quatre traditions sont bien sûr poreuses. Nous nous proposons toutefois de les expliciter après avoir décrit les théories éducatives correspondantes. Le panorama qui suit est très largement inspiré des travaux du LDES, sous la direction d'André Giordan[4].

2.2.1.2. Quatre grandes traditions

La première tradition, celle du modèle *transmissif* et dite « empiriste », conçoit la capacité d'apprentissage comme une simple mécanique d'enregistrement. Effectuée par un cerveau « vierge » et toujours disponible, l'acquisition d'un savoir est le résultat direct d'une transmission. La pédagogie qui découle de ce mode d'apprentissage implicite, souvent nommée « frontale », suppose seulement

[4] Giordan, A. Notes séminaire de recherches, LDES, 2006-07.

une relation linéaire et directe entre un émetteur (enseignant, journaliste, médiateur), détenteur d'un savoir et un récepteur (élève ou grand public) qui mémorise des messages. Dans l'enseignement, elle se traduit par des cours magistraux et des expériences guidées par des modes opératoires directifs ; au musée, par l'exposition d'objets ou de documents accompagnée de cartels explicatifs.

La deuxième, celle du modèle *behavioriste*, repose sur un entraînement promu au rang de principe et reconnaît trois grandes variables dans le processus : l'environnement qui stimule, l'organisme qui est stimulé et le comportement ou la réponse de l'organisme à la stimulation. Elle conduit à concevoir des situations pédagogiques accompagnées de questions susceptibles de réponses immédiates. L'apprentissage est favorisé par des « récompenses » (renforcements positifs) ou des « punitions » (renforcements négatifs). A travers un tel conditionnement, l'individu finit par adopter le comportement adéquat, celui qui lui évite les renforcements négatifs.

La troisième tradition, celle du modèle *constructiviste*, suppose implicitement que l'apprendre n'est pas affaire de transmission mais de « construction », où l'élève est « acteur » de l'assimilation de son propre savoir. Elle part des besoins spontanés et des intérêts « naturels » des individus, prônant leur libre expression, leur créativité et leur savoir-être. Elle met en avant la découverte autonome ou encore l'importance des tâtonnements.

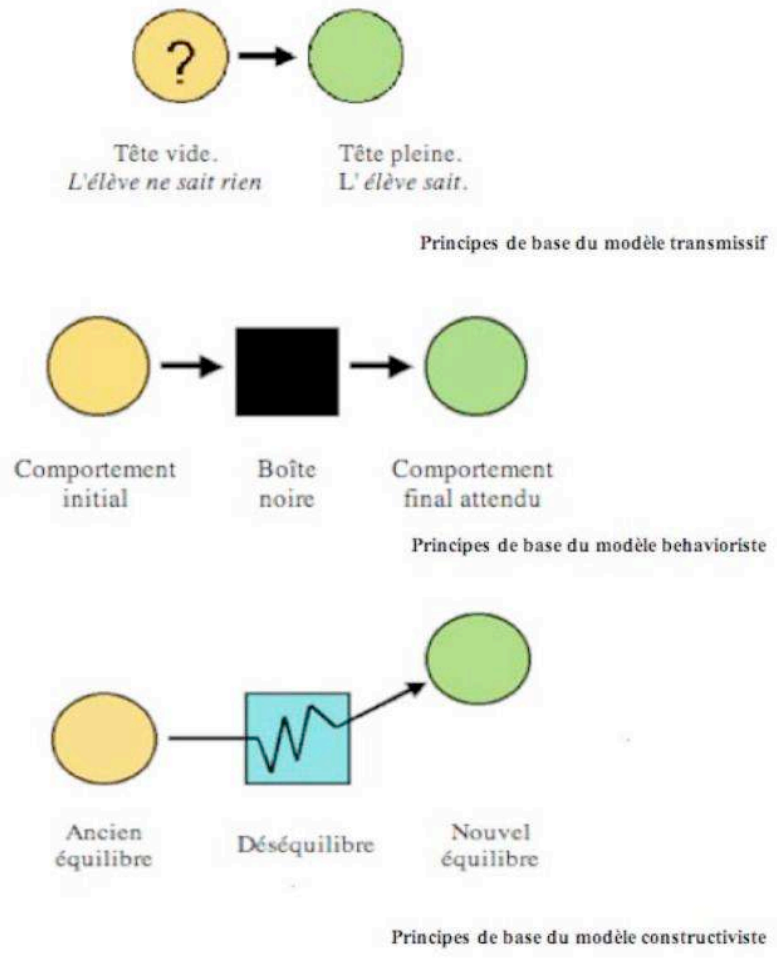


Figure 4 : Principes de base des différents modèles de l'apprendre (d'après Giordan, 2010).

La quatrième tradition enfin, celle du *cognitivisme*, repose sur la capacité que les sciences cognitives se sont construite d'avoir un accès direct au cerveau, à sa structure, à sa plasticité, à son activité et à son évolution. Après avoir été des sciences humaines pendant des décennies, voire des siècles, certaines

branches des sciences de l'éducation commencent à relever des sciences expérimentales objectives, fondées sur des observations directes et non plus des interprétations statistiques, des élaborations théoriques formelles et déterministes et non plus phénoménologiques et qualitatives. Leurs applications sont encore peu médiatisées, mais c'est dans le champ des technologies numériques pour l'éducation qu'elles semblent pour le moment les plus performantes, et notamment pour compenser les handicaps ; elles s'appuient pour ce faire sur des notions nouvelles telles que l'*affordance* (Norman, 1999), l'*hapticité* (Pasquinelli, 2008), la *sensorimotricité* ou l'*énaction* (Botvinick & Cohen, 1998)…

La figure 4 schématise les modèles associés aux trois premières de ces traditions. On notera qu'à l'inverse des modèles conçus par les neurosciences, les trois modèles didactiques qui les sous-tendent sont purement phénoménologiques. Inspirés de réflexions parfois anciennes, ils ont en effet été fondés sur une observation qualitative de situations d'apprentissage variées, et très rarement sur l'étude des processus mentaux qui y président. Pour autant, ces approches phénoménologiques de l'apprendre s'avèrent relativement performantes pour expliciter leur objet et induire des applications pédagogiques même si, comme pour la plupart des approches qualitatives, leurs faiblesses principales résident dans leurs propriétés prédictives.

Ces quatre grandes traditions, auxquelles nous ajouterons une description spécifique des modèles de changement conceptuel, font l'objet des sections suivantes.

2.2.2. La tradition empiriste

Les approches frontales reposent sur une transmission linéaire et directe entre un émetteur et un récepteur lors de laquelle le cerveau de l'apprenant décode l'information et l'enregistre. Plusieurs tendances peuvent être regroupées sous cette tradition générale.

2.2.2.1. Manifestations et auteurs

- Les théories académiques

Les théories que Giordan nomme « académiques » sont les plus fréquemment employées dans les systèmes éducatifs. Egalement appelées « rationalistes », « réalistes », « essentialistes » ou « classiques », elles focalisent leur attention sur la transmission de connaissances (Bloom, 1987).

Selon Giordan, « *Les pédagogies de cette tendance misent sur l'exposition des connaissances, le plus souvent disciplinaires, par un maître (Snyders, 1973 ; Houssaye, 1987). Le rôle de l'enseignant ou du médiateur consiste alors à transmettre des contenus, et celui de l'élève ou du public à les assimiler. Le cours dogmatique ou frontal où l'enseignant est face aux élèves est le plus souvent préconisé. L'excellence à viser est une structuration des idées et une progression dans leur présentation. L'effort maximum à fournir pour l'élève est dans l'écoute et dans un travail de mémorisation. Parfois celui-ci, logiquement conçu du moins dans la culture de l'enseignant, peut s'appuyer sur des illustrations (schémas ou photos) ou encore sur des expériences qui confirment les propos du formateur.* ».

- Les théories épistémologiques

Ce courant repose sur l'idée que l'acte d'enseignement est facilité par une meilleure connaissance des structures du savoir ou des méthodes propres à les produire et prend comme point de départ l'élaboration historique ou épistémologique du savoir. Il suppose même parfois que l'élève apprend en rencontrant les mêmes difficultés que les hommes qui, par le passé, ont élaboré les connaissances enseignées aujourd'hui et, qu'en conséquence, il est utile de le faire passer par les mêmes étapes ou errances (de Hosson & Kaminski, 2007). Ce sont les écrits de Kuhn (1970) et Popper (1935) dans les pays anglo-saxons, ou de Bachelard (1934, 1938) dans les pays francophones, qui sont principalement mis à contribution avec les idées de changement de paradigme, de réfutabilité ou d'obstacle épistémologique.

Il en résulte des pratiques éducatives très diverses. Chez les tenants de Bachelard, l'enseignant essaie de repérer les obstacles et d'en expliciter la nature (Canguilhem, 1968 ; Rumelhart & Mac Lilland, 1986) en s'appuyant sur l'histoire des sciences, prévoyant ensuite pour chacun d'eux des situations pédagogiques propres à les dépasser ou à les éviter. Le plus souvent, l'enseignant essaie de faire exprimer les représentations des apprenants puis il explique en tenant compte des obstacles potentiels (Bednarz & Garnier, 1989).

Notons que l'inspiration épistémologique peut également être employée pour concevoir des modèles d'apprentissage, en termes de processus et non plus seulement de contenus. C'est notamment le cas de l'origine des théories de changement conceptuel que nous aborderons plus loin.

- Les théories technologiques

Les théories technologiques mettent l'accent sur l'amélioration du message par le recours à des technologies appropriées. Le mot « technologie », pris dans un sens très large, comprend autant les procédures de communication (impliquant un émetteur, un récepteur, des codes…) que le matériel didactique de communication et de traitement de l'information (panneaux, projections fixes, films, bandes son, CD et DVD… (Lockard *et al.*, 1990 ; Wager *et al.*, 1990 ; Lapointe, 1990)). Elles sont de plus en plus centrées sur l'ordinateur et les technologies numériques, incluant l'analyse de l'usage du téléphone portable ou de *Wikipedia*, voire des jeux vidéo (Gaume, 2008) mettant l'accent sur les environnements informatisés d'apprentissage et sur les logiciels interactifs (Suppes, 1988 ; Bergeron, 1990).

Selon Giordan (2010), « *Les principes directeurs de ce courant sont la décomposition du message et sa visualisation de façon saisissante pour que l'apprenant puisse y adhérer automatiquement par une sorte d'imprégnation (Tickton, 1971). La plupart de ces approches misent actuellement sur les capacités « impressionnantes » de l'ordinateur (Kearsley, 1987 ; Lawler, 1987 ; Solomon, 1986). Celui-ci peut facilement gérer de multiples sources d'informations (images, sons, écriture, etc.) ou permettre aux apprenants d'entrer dans des simulations (Papert, 1981).* ».

2.2.2.2. Description du modèle sous-jacent

Le modèle empiriste s'appuie sur l'idée que l'apprentissage procède par des processus d'imprégnation et de mémorisation, et se réalise à travers un acte de transmission.

« *L'empirisme est une doctrine philosophique qui souligne le rôle de l'expérience dans la connaissance humaine, en minimisant la part de la raison. Le terme « empirisme » est dérivé du grec* empeiria*, qui signifie « épreuve » ou « expérience »*[5] ». Selon ce modèle, tout ce que l'enfant sait provient d'une expérience vécue. Le premier à émettre cette hypothèse est le philosophe anglais John Locke (1632-1704) : « *Il n'est rien dans l'intellect, qui n'ait auparavant été dans la sensation* », écrit-il. Dans son *Essai sur l'entendement humain* (1693), il présente l'idée -révolutionnaire pour l'époque- que nos images, nos pensées sont le fruit de notre seule expérience. Contrairement aux penseurs *Rationalistes* de l'antiquité et de son époque qui ne jurent que par une raison innée, Locke développe une vision du cerveau qui est celle d'une *tabula rasa*, c'est-à-dire « un tableau vierge » ou encore « une pièce sans meubles ». Cette vision est également celle de Condillac (1754) qui décrit l'esprit humain comme un « *objet de cire conservant en mémoire les empreintes qu'on y a moulées* », considérant ainsi que le savoir s'imprime dans la tête de l'élève comme on pourrait l'imprimer sur une cire vierge.

Giordan identifie trois postulats sous-tendus par ce modèle. Il suppose en premier lieu la neutralité de l'apprenant. Quel que soit le contenu, ce dernier doit pouvoir enregistrer « l'expérience » des autres. Faisant fi de ses convictions initiales qu'il s'agit d'ignorer, l'élève est supposé entrer directement dans une proposition qui lui est formulée par celui qui détient le savoir. Selon Giordan (2010),

[5] Hachette multimédia (2001) – en ligne.

« *L'apprendre dans ce cas suppose seulement une relation linéaire et directe entre un émetteur (l'enseignant), détenteur d'un savoir et un récepteur (l'élève) qui enregistre une suite de messages proposées suivant une logique préalable. Pour faire passer son message, l'enseignant postule qu'il lui suffit de présenter ou d'expliquer, éventuellement d'argumenter.* ».

Le second postulat repose sur la transparence d'une transmission de connaissances finement découpées. Si l'enchaînement du cours a été bien pensé, les difficultés graduées, un élève qui « joue le jeu » ne doit pas rencontrer d'obstacles à la compréhension. Formulée par la plupart des pédagogues du XVIIème et XVIIIème siècles, cette proposition s'est généralisée sous le dogme : pour apprendre, il suffit d'être en situation de réception. Le rôle de l'enseignant est d'exposer clairement, de montrer avec conviction, éventuellement de répéter.

Enfin, le troisième postulat envisage le décodage et la mémorisation de chacune des informations traitées séparément comme un simple processus de stockage. Son organisation est supposée immédiate, quelques exercices de mémorisation et d'application pouvant éventuellement venir la renforcer.

Pour ancien qu'il est, ce modèle n'est toutefois pas totalement dépassé si l'on considère que, comme tout modèle, il possède un domaine d'application particulier. Car en effet, il décrit relativement bien certains apprentissages du nourrisson et l'apprentissage d'une langue nouvelle par immersion et imprégnation, ou encore la manière dont on peut apprendre à la lecture d'un livre, à l'écoute d'une conférence et plus généralement dans toute situation de transmission frontale d'un savoir ou d'apprentissage « par cœur » (figure 5). Cette idée ne se limite d'ailleurs pas aux seules connaissances et peut être étendue aux autres types de savoirs. L'expérience montre par exemple qu'il arrive qu'un enfant joue mieux au tennis en période de retransmission télévisée d'un tournoi international qu'il regarde plusieurs heures par jour[6].

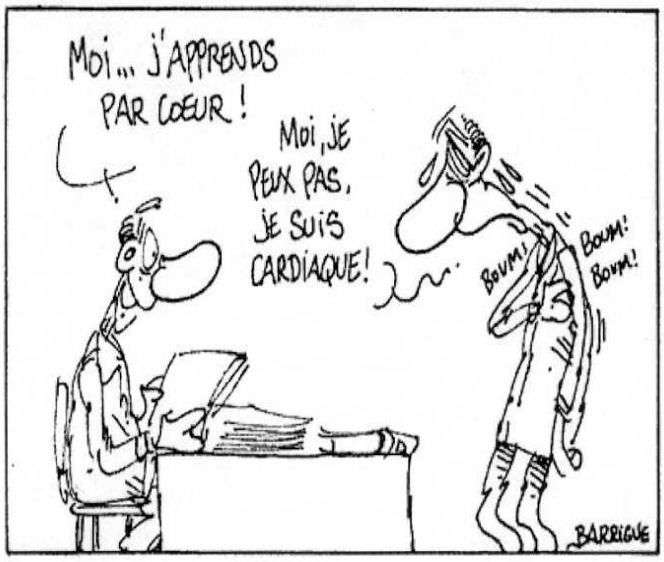


Figure 5 : Illustration humoristique de l'apprentissage par cœur.

Mais force est d'admettre que le domaine d'application de ce modèle s'avère extrêmement restreint, les postulats évoqués plus haut impliquant des caractéristiques pédagogiques dont l'absence constitue autant d'obstacles souvent insurmontables pour apprendre.

6 Notes personnelles. Entretien avec un entraîneur de tennis.

2.2.2.3. Caractéristiques des pédagogies dérivées

Le modèle empiriste sous-tend donc implicitement ou explicitement l'ensemble des « pédagogies frontales », où « celui qui sait » divulgue son savoir à « celui qui ne sait pas ». Sa concrétisation classique est le cours *ex-cathedra* lors duquel l'enseignant expose un savoir à ses élèves. Mais elle se retrouve également dans la projection d'une séquence vidéo, dans la démonstration d'une expérience faite par l'enseignant, voire dans l'enseignement expérimental des sciences, par le biais du classique « mode opératoire » directif, distribué aux élèves lors de la réalisation d'une expérience.

Contrairement à ce que croient nombre d'auteurs, les fiches d'activités ne sont pas une pratique active qui les rangerait dans un modèle constructiviste ; elles sont le plus souvent du frontal indirect. Des pratiques dialoguées viennent parfois certes enrichir cette approche pédagogique. Mais bien souvent, le dialogue n'a pour but que d'intéresser ou d'ancrer les données : l'enseignant déroule son cours à partir de ses présupposés. L'enseignant fait faire à ses élèves ce qu'il aurait fait lui-même, de la façon dont il l'avait pensé au préalable.

2.2.2.4. Avantages et limites

L'avantage indéniable de ces pédagogies réside dans le fait qu'elles permettent de fournir un maximum d'informations à un maximum de personnes et dans un minimum de temps. C'est d'ailleurs à cette caractéristique qu'elles doivent leur succès dans l'enseignement universitaire.

En contrepartie, leurs inconvénients sont multiples. Le principal réside dans le décalage inévitable qui s'installe entre l'enseignant et l'enseigné, le premier possédant des modes de raisonnement et un *cadre de référence* (figures 6 et 34) qui font défaut au second (Eastes & Pellaud, 2004a).

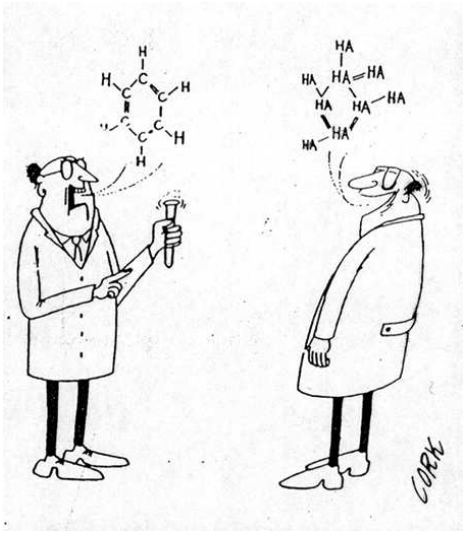


Figure 6 : Illustration humoristique de l'existence d'une « culture scientifique commune », pas nécessairement partagée par les élèves.

Par cette dernière notion, nous entendons le cadre de pensée et d'interprétation du monde qu'un individu s'est construit au cours de son vécu. Il dépend du milieu familial et socioculturel dans lequel il a grandi et conditionne la manière dont il reçoit, analyse et stocke les informations nouvelles. Il peut, dans certains cas, conduire à des raisonnements spécifiques ; ainsi, les habitants des pays européens ont pu, durant la Guerre Froide, craindre de se trouver sous le passage des missiles russes et américains ; or si l'on s'en réfère à la carte du monde vue depuis l'URSS à l'époque (figure 7), on s'aperçoit qu'il n'en est rien. Un raisonnement issu d'un cadre de référence faussé, dont ont découlé des conséquences non anecdotiques, telles la construction d'une multitude d'abris atomiques, notamment en Suisse.

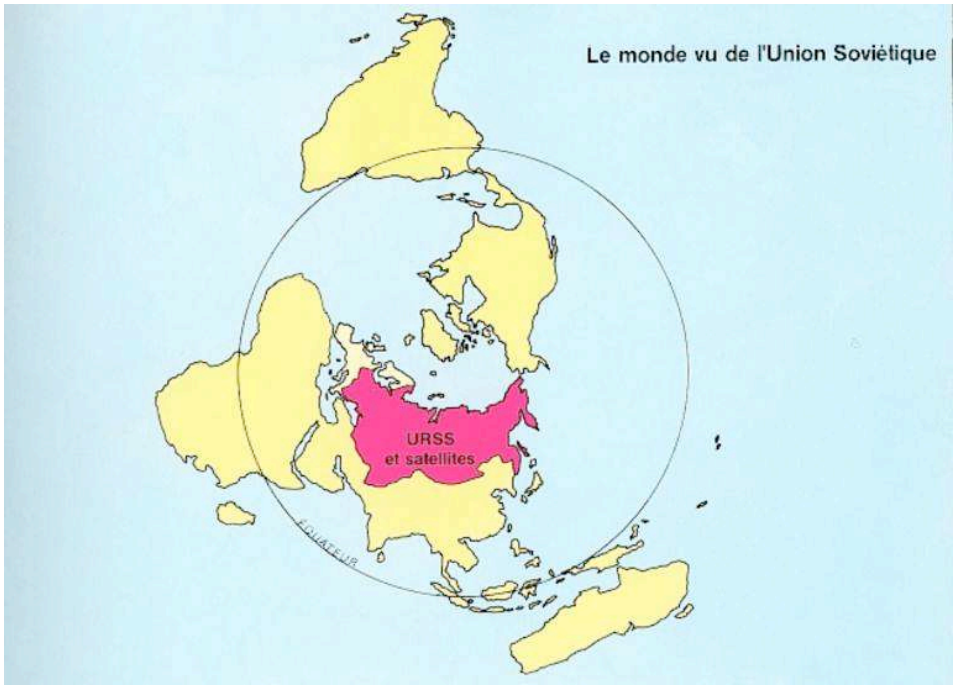


Figure 7 : La notion de « cadre de référence », illustrée par l'existence de plusieurs visions du monde selon l'origine géographique.

Un autre obstacle se retrouve dans la fréquente absence de questionnement des élèves au regard des points abordés par l'enseignant, alors que bien souvent naturellement, le message n'est *entendu* que s'il est *attendu* et que la motivation que procure la perspective de retrouver le thème traité à l'examen peut s'avérer nettement insuffisante. Ainsi, finalement, le risque est grand pour l'enseignant de fournir des réponses incompréhensibles à des questions que les élèves ne se posent pas.

Tous ces paramètres créent autant d'obstacle à l'apprendre, à commencer par le langage. Sous les mêmes mots, il peut exister un décalage énorme entre le savoir enseigné et les connaissances préalables des élèves (enfants ou adultes). De plus, cet enseignement conduit le plus souvent à la fermeture de l'esprit et à l'ennui. D'où le nombre d'échecs ou d'exclusion de ce type de pédagogie. Dans le meilleur des cas, l'élève répète et donne ainsi l'illusion d'avoir appris sans forcément avoir compris.

Manifestement, dans cette approche, l'erreur a été (et est toujours) de croire que l'on peut fournir directement du savoir aux individus. L'étude didactique la plus simple le montre : la structure de pensée d'un apprenant ne fonctionne définitivement pas comme une bande magnétique. Ce que l'individu enregistre n'est pas le stimulus lui-même, mais ce qui a du sens par rapport à l'idée qu'il se fait de ce qu'il a à faire avec ce qui lui est dit...

2.2.3. La tradition behavioriste

2.2.3.1. Manifestations et auteurs

Les théories « behavioristes » (de l'anglais *behaviour*, qui signifie « comportement ») se sont développées en réaction aux approches dites « mentalistes » de la fin du XIXème siècle et présentent l'apprendre comme le résultat d'un conditionnement de type *réflexe* faisant appel à des stimuli positifs (récompenses) ou négatifs (punitions). Ayant conduit à l'« apprentissage programmé » ou « skinnérien », elles mettent l'accent sur l'apprentissage de comportements adéquats dans une situation donnée, en termes de connaissances ou de gestes.

Hostiles à la méthode d'introspection, la tradition behavioriste émane des études sur le conditionnement animal menées par le neurophysiologiste russe Pavlov. Historiquement, c'est John

Broadus Watson qui fut le premier à utiliser le terme « behavioriste » dans un très court article considéré aujourd'hui comme le manifeste du behaviorisme : "*Psychology as the behaviorist views it*" (1913 ; voir également Watson 1908, 1914, 1915, 1930, 1936). Mais le modèle fut surtout développé par les psychologues américains Holland et Skinner (Skinner, 1968 ; Holland & Skinner, 1987).

Skinner introduisit notamment la notion de « conditionnement opérant » pour expliquer les comportements appris au cours de l'histoire d'un individu. Il se fonda pour ce faire sur l'effet dit « de Thorndike » (1911), stipulant que le comportement est fonction de ses propres conséquences, avant de développer également les notions de « renforcement » et de « façonnement ».

En d'autres termes, selon cette théorie, la manière dont les rats apprennent à s'orienter dans un labyrinthe et la manière dont des bébés humains apprennent à parler sont fondamentalement Similaires (Skinner, 1957) ; dans les deux cas, l'organisme associe des *stimuli* et des réponses. On en déduit évidemment l'inutilité de l'effort supplémentaire consistant à étudier des bébés humains, puisqu'il est autrement plus facile de réaliser des expériences sur des rats de laboratoire.

Ce mouvement a eu beaucoup d'influence sur les enseignants professionnels et technologiques. Dans l'enseignement général, il a conduit à développer l'enseignement programmé (Landa, 1974) et la pédagogie par objectifs (Bloom *et al.*, 1956 ; Mager, 1962 ; Krathwohl, 1964). Ses retombées sont encore observables dans de nombreux programmes, notamment dans les pays anglo-saxons et dans certains outils pédagogiques. Nombre de musées et d'expositions ont également utilisé ce principe.

Mais la théorie a été fort mise à mal à partir des années 1950, notamment grâce aux travaux du linguiste Chomsky, qui a démontré que l'acquisition du langage était tout simplement impossible par un simple mécanisme d'association (Chomsky, 1957 ; Piatelli-Palmarini, 1979). Les linguistes chomskyens lui préfèrent depuis lors une vision qui fonde l'acquisition du langage sur une grammaire générative innée, ce qui réduit d'autant l'importance du stimulus.

2.2.3.2. Description du modèle sous-jacent

Le modèle de Watson postule que l'on ne peut accéder aux états mentaux des individus, car ils sont inobservables. Assimilé à une « boîte noire », la pensée de chaque individu peut cependant être « influencée » de l'extérieur par des situations bien conçues : c'est ainsi qu'il pourra apprendre. Les propositions du modèle behavioriste sont par suite fondées sur un principe d'entraînement par « conditionnement » et par « renforcement ». L'approche behavioriste de l'apprentissage s'effectue notamment à travers l'étude des interactions de l'individu avec son milieu. Il se concentre sur l'étude du comportement observable et du rôle de l'environnement dans le déclenchement de ce comportement. Le modèle s'appuie dès lors sur l'idée que l'apprentissage procède par des processus de *conditionnement*, *d'entraînement* et de *renforcement*, renforcés par des *stimuli* positifs (récompenses) ou négatifs (punitions), extérieurs (environnement externe) ou intérieurs (environnement interne).

Bien qu'il apparaisse grossier, ce modèle donne une représentation de l'apprendre relativement pertinente dans quelques situations spécifiques, telles que la découverte d'un logiciel inconnu ou d'un jeu vidéo, au cours de laquelle les erreurs et réussites successives de l'utilisateur lui permettent d'en découvrir les règles. La pratique du ski, de l'équitation ou du bricolage est régie par ces mêmes règles : avec ou sans enseignement, une partie de l'apprentissage des gestes est conditionnée par les chutes ou les « déclics » qui, soudain, font prendre conscience de détails inexplicables par un instructeur. Imaginons encore un individu qui emménagerait dans une ville ou un quartier qu'il ne connaîtrait pas : les premiers jours, il tentera des explorations diverses pour apprendre à se rendre de la manière la plus rapide ou la plus agréable possible sur son lieu de travail, à la boulangerie, au supermarché… Ce faisant, il empruntera des impasses, rencontrera d'affreux carrefours et découvrira des parcs agréables à traverser. Peu à peu, par un apprentissage parfaitement décrit par le modèle behavioriste, il aura acquis une idée précise de la cartographie de son quartier et saura appliquer ses nouvelles connaissances à ses desseins quotidiens.

Mais ce modèle, bien que relativement explicatif dans les cas évoqués ci-dessus, n'apporte pas de grand progrès à la compréhension de l'acte d'apprendre ; il nous semble même essentiellement relever d'une certaine forme d'empirisme, « suractivé » par la motivation qu'induit le désir, la satisfaction, la douleur ou la peur.

2.2.3.3. Caractéristiques des pédagogies dérivées

L'application à la pédagogie d'un apprentissage vu comme un processus de type stimulus-réponse conduit aux idées de « conditionnement » et de « renforcement ». Pour l'apprenant, le renforcement consiste à savoir qu'il a donné la bonne réponse et à en éprouver de la satisfaction, éventuellement grâce à une récompense (bon point, bonne note, etc.). Cependant, pour que le renforcement soit efficace, il faut que ce dernier porte sur une petite quantité d'informations et que l'action soit répétée souvent. L'approche behavioriste conduit alors à décomposer la matière à enseigner en unités élémentaires de connaissances, chacune faisant l'objet d'exercices particuliers.

En classe, les théories behavioristes ont conduit à promouvoir des exercices autoprogrammés sur papier dès les années trente. Avec le développement de l'informatique, nombre d'enseignements programmés sur ordinateurs ont pris un essor considérable à la fin du XXème siècle. Reposant sur un processus de type « stimulus-réponse », ces pratiques rencontrèrent quelques succès au travers d'apprentissages élémentaires de type conditionnement. Elles furent également utilisées dans l'acquisition d'automatismes de conduite, notamment dans le pilotage de trains ou d'avions.

L'approche a encore être utilisée dans les musées avec les expériences de type « presse-bouton », comme au *Palais de la Découverte* à Paris ou au *Lawrence Hall of Science* de Berkeley, où le visiteur est invité à actionner une manette avant même qu'on ait pris la peine de susciter son questionnement sur le phénomène illustré. L'environnement offert par ces expositions est alors abusivement qualifié d'« interactif », dans la mesure où l'apprentissage ne se fait pas par une démarche réflexive, mais par tâtonnements relativement passifs.

Elle remporte également un certain succès dans les applications informatiques. Nombre de jeux pour enfants proposées parmi les applications pour smartphone se fondent sur cette approche. Un exemple précis concerne certaines parties d'un outil pédagogique numérique conçu par l'association les *Atomes Crochus* pour le compte de l'*Agence Spatiale Européenne* (ESA), sur le thème de l'observation de la Terre par satellite, et intitulé *Ciel, ma planète !* [7] (figure 8).

Figure 8 : Plaquette et image extraite de l'outil numérique *Ciel, ma planète !*

[7] Téléchargeable gratuitement sur www.atomes-crochus.org/article37.html - Dernière consultation le 05/02/2013.

Parmi les diverses activités proposées, certaines sont frontales (fixes ou dynamiques) et d'autres sont présentées sous forme de quizz à l'inspiration très behavioriste. Il est toutefois intéressant de noter que lorsque les quizz sont réalisés en classe, en commun, sous la coordination d'un enseignant, ils peuvent conduire à des séquences pédagogiques de type socioconstructiviste, comme nous le verrons dans la section *2.3.4. Influence de la situation pédagogique sur le modèle interprétatif*.

2.2.3.4. Avantages et limites

Excellentes pour les apprentissages de gestes techniques et de savoir-faire, les pédagogies behavioristes sont extrêmement limitées dès qu'il s'agit d'acquérir des connaissances qui nécessitent réflexion et mises en relations. On leur reproche essentiellement de ne s'intéresser qu'aux entrées (stimuli) et aux sorties (comportements) en renonçant à comprendre la structure mentale, qui apparaît de ce fait souvent comme passive (figure 9). Les savoirs préexistants, les croyances, mais également les désirs, les intentions de l'élève sont peu pris en compte, alors qu'ils constituent autant de facteurs limitants… ou stimulants.

Figure 9 : Illustration humoristique de la pédagogie behavioriste…
librement inspirée par F. Pellaud de Uderzo et Goscinny (*Astérix et les Normands*).

Selon Giordan (2010), « *Elles ne favorisent pas la motivation des apprenants sur la durée, et nombre d'enseignements de ce type finissent par se révéler fastidieux. D'autre part, elles ne permettent pas les apprentissages un peu complexes. Les tenants du behaviorisme tentent alors de décomposer ces derniers en sous-objectifs qu'ils abordent séparément. Or un savoir complexe est rarement la somme des sous-savoirs : des phénomènes d'émergence et de régulation surviennent, qui ne peuvent pas être traités par des approches de type stimulus-réponses*. ».

Piaget (1966, 1969), par exemple, réfutait l'idée de résumer l'intelligence à des phénomènes d'apprentissage et d'imitation sur le modèle de l'éthologie animale, sans tenir compte de la façon dont le savoir se construit chez un sujet. Les études sur le langage évoquées plus haut ont également joué un rôle important en s'opposant à la vision behavioriste qui le considéraient comme un ensemble d'habitudes apprises par observation et conditionnement.

Finalement, la principale limite des théories empiriste et behavioriste réside dans leur incapacité à interpréter les mécanismes d'évolution des états mentaux ; or sans une telle connaissance, il est difficile d'en déduire des propositions pédagogiques. Contrairement aux théories plus modernes dont

la description suit, elles présentent en outre le grand inconvénient de placer au cœur de leurs modèles les processus d'acquisition du savoir plutôt que le cheminement intérieur de l'individu qui l'intègre à ses connaissances préexistantes.

2.2.4. La tradition constructiviste

Contrairement aux deux traditions précédentes, les théories qui relèvent de cette tradition supposent une structure cognitive déjà existante chez l'apprenant. Cette dernière se « développe » principalement par « maturation » au cours d'une série d'étapes. Elle facilite la mémorisation et constitue un point d'ancrage pour les nouvelles données à acquérir.

Dans la tradition constructiviste, les étapes de la construction du savoir sont supposées être largement définies par des paramètres biologiques qui définissent un développement « naturel » de l'enfant. Leibniz y faisait déjà référence (1704) mais ce sont les résultats des recherches menées par le psychologue Jean Piaget sur le développement des jeunes enfants (1947) qui ont valu à cette conception de l'apprendre le formidable essor que l'on connaît.

2.2.4.1. Manifestations et auteurs

- Les théories génétiques

Présente chez de nombreux psychologues de la fin du XIXème siècle, cette tendance a pris une importance grandissante après la dernière guerre (1939-45), et ce jusqu'aux années 70. Parmi les auteurs les plus fréquemment citées, on peut noter Wallon (1945), Gagné (1965, 1976), Bruner (1960, 1966), Piaget (1966, 1967), Ausubel *et al.* (1968). Au cours des trente dernières années, ce sont ces quatre derniers chercheurs qui ont eu le plus d'impact sur les pratiques éducatives.[8]

Robert Mills Gagné était un psychologue de l'éducation américain, bien connu pour son livre *Conditions of Learning* (1965). Il contribua entre autres aux théories de l'ingénierie pédagogique pour la formation sur ordinateur et l'apprentissage multimédia. Il distingue d'une part des concepts « concrets », dont l'apprentissage est basé sur des propriétés observables comme l'identification d'une classe au moyen de ses exemples, et d'autre part des concepts « définis » pouvant être appris au moyen d'une définition, qu'il nomme encore concepts « relationnels ». Pour lui, l'apprentissage se fait au travers du langage et des concepts concrets, qui sont progressivement remplacés par des concepts définis. Ainsi, le concept concret « microbe » est transformé progressivement en concept défini de « virus HIV » ou de « staphylocoque doré ».

Jérôme Bruner, psychologue américain, met l'accent sur l'idée de *catégorisation*, partant du principe que l'homme interprète le monde en termes de ressemblances et de différences. Il considère la médiation sociale, exercée sur un mode communicationnel, comme très importante dans l'apprendre : l'adulte guide l'enfant pour qu'il se conforme à des formes standardisées d'échanges réguliers et ritualisés, à l'intérieur desquelles l'enfant, grâce à l'étayage de l'adulte, pourra s'autonomiser dans des conduites de résolution de problèmes.

Considéré comme l'un des pionniers de la révolution cognitive dans les années 40, il émet l'idée d'une psychologie qui réintègre l'esprit dans l'explication des comportements. Le sens ne se construit pas dans le cerveau mais est donné par la culture. Le système symbolique que l'élève utilise pour construire la signification est ainsi en place avant l'apprentissage formel, dans la culture.

Pour David Paul Ausubel, psychologue américain, tout est affaire d'intégration, facilitée par l'existence de « ponts cognitifs » qui rendent l'information signifiante par rapport à la structure globale préexistante.

---

8 Giordan, A. Notes séminaire de recherches, LDES, 2006-07.

Dans son cadre conceptuel, les nouvelles connaissances ne peuvent être apprises que si les trois conditions suivantes sont réunies :

- Des concepts généraux doivent être disponibles et se différencier progressivement au cours de l'apprentissage ;
- Une « consolidation » doit être mise en place pour faciliter la maîtrise des leçons en cours : les informations nouvelles ne peuvent être présentées tant que les informations précédentes ne sont pas maîtrisées.
- La « conciliation intégrative », qui consiste à repérer les ressemblances et les différences entre les anciennes connaissances et les nouvelles, à les discriminer, et à résoudre éventuellement les contradictions ; de là elle doit conduire obligatoirement à des remodelages.

Les travaux de Jean Piaget et des psychologues généticiens de l'école genevoise (Inhelder, 1966 et Bang, 1989) sont également fréquemment cités. Ils reposent sur les idées « d'assimilation » et « d'accommodation ». Lors de l'apprentissage, il s'agit de rattacher la nouvelle information à ce qui est déjà connu, de la greffer sur des notions en prenant en considération les « schèmes » dont dispose le sujet (Piaget, 1967), qui sont très souvent réorganisés par les nouvelles données. L'apprenant fait entrer dans sa propre organisation cognitive les données du monde extérieur, les informations nouvelles sont traitées en fonction des acquis constitués antérieurement : il les « assimile ». En retour s'effectue une modification des schèmes de pensée en place en fonction des circonstances nouvelles : c'est « l'accommodation ».

Mentionnons encore les apports de Vygotsky (1930, 1934, 1978), fondateur de la psychologie soviétique censuré durant toute la période stalinienne. Il ne sera découvert qu'à partir de 1985 sur le plan éducatif pour son idée de « zone proximale de développement », qui décrit l'espace conceptuel entre ce que l'enfant peut apprendre de lui-même et ce qu'il peut apprendre avec l'aide d'un adulte. Parce qu'il s'est concentré sur les rôles que la société joue dans le développement d'un individu, il est souvent considéré comme le père du *socioconstructivisme*, qui souligne l'impact de la collaboration, du contexte social et des négociations sur l'apprentissage.

- Les théories sociales

Dans la lignée de Vygotsky, les théories sociales de l'éducation insistent quant à elles sur les déterminants sociaux ou environnementaux de la vie éducative (classes sociales, hérédité sociale et culturelle, provenance sociale des étudiants, élitisme…). Elles se sont largement développées dans les années 60 et 70, en promouvant l'idée que le système éducatif a pour principale mission de préparer les apprenants en dépassant les handicaps socioculturels, et en déplorant que les institutions éducatives reproduisent au contraire les inégalités sociales et culturelles sans se préoccuper de ce qui se passe à l'extérieur de l'école.

Les théories sociales mettent encore l'accent sur les transformations à apporter à l'éducation en fonction de ses rapports avec la société (Freire, 1974) ; des transformations qui vont de l'analyse critique des fondements culturels et sociaux de l'éducation (Lobrot, 1972) à des propositions de changement radical de la société (Illich, 1970). Constituant une sorte de courant idéologique, dont les fondements sont plus politiques que scientifiques, elles s'opposent ainsi au mouvement cognitif préoccupé par la nature même du processus de la connaissance.

- Les théories humanistes

Giordan (2010) mentionne également les théories humanistes, également appelées « personnalistes », « libertaires », « pulsionnelles », « libres », ou encore « ouvertes », qui prennent appui sur la personne. Mettent en avant les notions de « soi », de « liberté » et « d'autonomie », elles insistent sur la liberté de l'élève, ses désirs, sa volonté d'apprendre.

Selon Rogers (1951, 1969), c'est la personne en situation d'apprentissage qui doit maîtriser son éducation en utilisant ses possibilités intérieures. L'enseignant, dans ses relations avec les apprenants, ne joue qu'un rôle de facilitateur : il doit viser continuellement l'autoactualisation de l'apprenant (Paré, 1977). On doit à cette approche le développement d'écoles dites « ouvertes », « alternatives », « non directives » qui, à partir des années 60 et 70, s'inspirèrent d'une approche du développement intégral de l'enfant (Kirschenbaum *et al.*, 1989).

- Les théories contructivo-didactiques

S'inspirant des théories précédentes, nombre de mouvements pédagogiques ont mis en place des modèles d'enseignement opératoires, s'appuyant sur le nom de leurs fondateurs : Montessori, Decroli, Dewey, Freinet. Mais des psychologues aujourd'hui trop souvent oubliés comme Binet, Claparède ou Ferrière ont également joué un rôle moteur considérable dans l'émergence du constructivisme pédagogique. Giordan mentionne encore l'émergence plus récente de l'auto-socioconstructivisme du GFEN (groupe français de l'éducation nouvelle) dans les pays francophones, et de l'*inquiry method* dans les pays anglo-saxons.

- L'*inquiry method*

Egalement nommée « approche expérimentale », « démarche scientifique », ou « démarche d'investigation » en français, cette méthode est une pratique de classe qui met en avant l'action, l'interrogation, l'exploration, l'expérimentation, l'investigation, la discussion et la construction collective et non pas l'apprentissage d'énoncés figés à mémoriser. Elle souhaite « renverser » la pédagogie utilisée pour enseigner, en se fondant sur la résolution de problèmes, sur le questionnement en tant que guide de l'apprentissage et en s'appuyant sur des méthodes inductives destinées à augmenter l'intérêt de l'élève.

Plutôt que de rechercher une réponse correcte unique, les enfants interprètent le problème, recueillent les informations nécessaires, identifient les solutions possibles, évaluent les différentes options disponibles et formulent des conclusions : « *On apprend par l'action, en s'impliquant ; on apprend progressivement, en se trompant ; on apprend en interagissant avec ses pairs et avec de plus experts, en explicitant par écrit son point de vue, en l'exposant aux autres, en le confrontant à d'autres points de vue et aux résultats expérimentaux pour en tester la pertinence et la validité* » (Giordan, 2010).

2.2.4.2. Description du modèle sous-jacent

Les caractéristiques principales de la modélisation constructiviste ont été décrites plus haut lors de l'évocation des théories génétiques. Mais pour la décrire, on peut essentiellement retenir les concepts d'assimilation et d'accommodation, empruntés à la biologie de l'évolution : tout organisme *assimile* à ses propres structures ce qu'il prend de l'extérieur, y compris les informations récupérées par ses perceptions ; ce processus s'accompagne en retour d'une *accommodation*, c'est-à-dire d'une modification des organes sur un plan biologique ou des instruments intellectuels sur le plan cognitif. Si le sujet veut *assimiler* un savoir, il doit être capable *d'accommoder* en permanence son mode de pensée aux exigences de la situation.

Ici, comme le nom du modèle le suggère, l'apprendre est considéré comme le résultat d'une construction des savoirs par étapes successives ; il est synonyme d'accumulation et de superposition. Un rôle très important est accordé au « sujet », dans son développement cognitif et intellectuel. Les connaissances préalables d'un individu constituent alors le facteur déterminant de l'apprendre. Le courant constructiviste a ainsi eu le mérite de montrer qu'apprendre n'est pas le résultat d'empreintes que des stimulations sensorielles laisseraient dans l'esprit de l'élève à la manière de la lumière sur une pellicule photographique. Il n'est pas non plus le résultat d'un conditionnement opérant dû à son environnement.

Apprendre procède donc d'abord de l'activité d'un sujet, que sa capacité d'action soit effective ou symbolique, matérielle ou verbale. Elle est liée à l'existence de schèmes mentaux déjà en place qui sont progressivement activés. Tout savoir est une « *construction du sujet en réponse aux sollicitations de l'environnement* » : Piaget (1969) plaide ainsi pour une acquisition des connaissances par l'expérience, directe ou indirecte, plutôt que par la transmission. Le moyen utilisé par ses successeurs (Inhelder, 1966) est de faire surgir des « conflits cognitifs » dans l'esprit des élèves : ce que chacun croyait savoir ou savoir faire est bousculé et remis en question. Les conflits deviennent ainsi les moteurs mêmes de la connaissance.

Là encore, les situations bien décrites par ce modèle ne manquent pas. Pour revenir à l'idée du logiciel évoquée pour le modèle behavioriste, imaginons à présent la découverte par l'utilisateur (de traitements de texte, de tableurs, etc.), non plus d'un logiciel inconnu, mais d'une nouvelle version de ce même logiciel, améliorée par le concepteur ; c'est bien sur ses connaissances acquises antérieurement qu'il bâtira son aptitude à utiliser la nouvelle version. De même, ce modèle rend particulièrement bien compte de l'apprentissage des sciences tel qu'il se pratique dans les clubs scientifiques en situation extrascolaire, ou en classe à l'école primaire, dans les séances de type « démarche expérimentale ». On parlera toutefois plutôt dans ces derniers cas de *socioconstructivisme*, pour insister sur le rôle des interactions entre pairs dans le processus de construction du savoir.

2.2.4.3. Caractéristiques des pédagogies dérivées

Le modèle constructiviste a donné naissance à une pédagogie qui part des besoins spontanés et des intérêts « naturels » de l'enfant, visant l'expression personnelle, la créativité et le développement de l'autonomie, en octroyant une place importante aux hypothèses personnelles et à l'expérimentation individuelle ou en groupe. On attend de l'élève qu'il ne se contente plus de recevoir des données brutes, mais qu'il les sélectionne et les assimile : la construction du savoir s'opère par une grande place laissée à l'action et à l'expression des *représentations*, que sont les connaissances et idées préalables (et parfois encore les modes de raisonnement spontanés) de l'apprenant. Les méthodes dites « actives » à l'école sont fondées sur ce modèle éducatif, telles que l'opération *La Main à la Pâte*[9], reprise par les *PRESTE*[10] en France, tout comme un certain nombre de lieux d'investigations comme le *Children Museum* de Boston, la *Cité des Enfants de la Villette* (Paris), *Scientastic, le musée des sciences et des 5 sens* de Bruxelles ou la salle *Ebullisciences* à Vaulx-en-Velin.

2.2.4.4. Avantages et limites

Conformément au modèle dont elle découle, cette pratique éducative est fondée sur l'idée que les savoirs nouveaux complètent en les *accommodant* les savoirs antérieurs, ce processus conduisant, dans une perspective idéale, à une meilleure compréhension du phénomène abordé. Et en effet, elle s'acère excellente pour partir des besoins et intérêts spontanés de l'apprenant, permettre l'expression personnelle et la créativité, et pour développer l'autonomie (notamment par la valorisation des tâtonnements).

Le mode pédagogique qui l'illustre le mieux est non frontal et interactif : le *brainstorming* en est un excellent exemple, illustré notamment par une conférence expérimentale régulièrement donnée par l'association *Les Atomes Crochus*[11] sur le thème des pollutions et du changement climatique : pour tout support, une diapositive est présentée au public avec la question « *Est-ce que lorsque je respire, je pollue ?* ». S'en suivent en général une à deux heures de discussions et d'approfondissements théoriques, initiés par les réflexions et raisonnements des participants eux-mêmes qui, au lieu de rester sagement en

9 www.inrp.fr/lamap/accueil.html - Dernière consultation le 05/02/2013.

10 Programmes Rénovés de l'Enseignement des Sciences et de la Technologie à l'Ecole.

11 www.atomes-crochus.org - Dernière consultation le 11/03/2013.

position d'enregistreurs du message apporté par le conférencier, restent actifs et participent à sa construction. Au niveau des TICE, un outil tel que le livre magique *La Lumière en-Chantée*, produit en 2007 par les *Atomes Crochus* et téléchargeable librement sur leur site[12], est particulièrement en accord avec ce modèle, au sens où il s'est appuyé, dans sa forme et ses contenus, sur une comédie musicale scientifique créée de toutes pièces par une classe primaire, une année durant, en collaboration avec des scientifiques, des musiciens et des comédiens (figures 10 a et 10b).

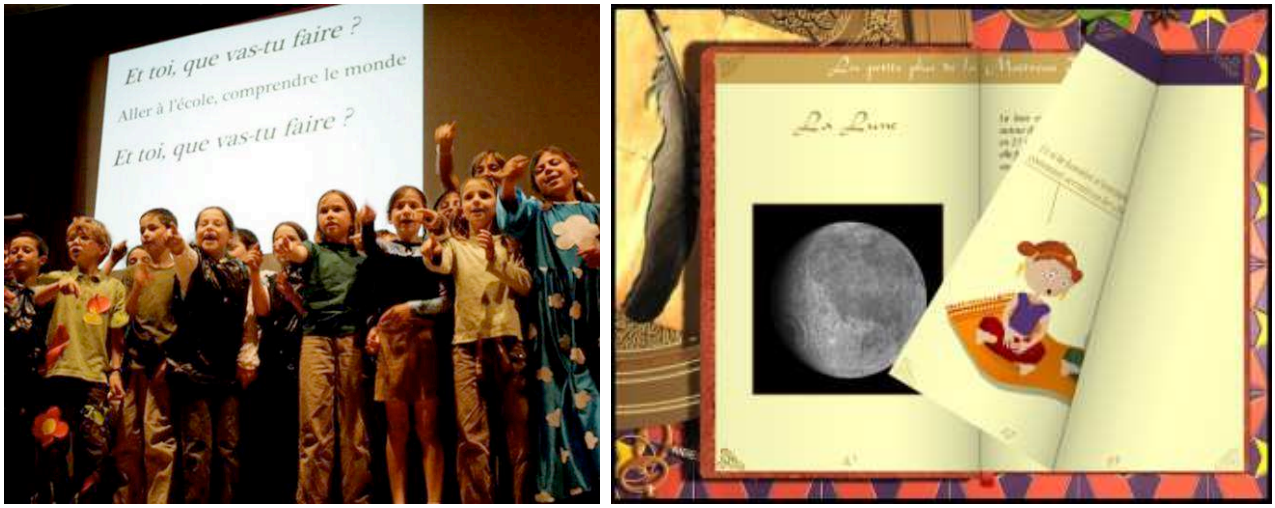


Figure 10 : Images a/ du spectacle et b/ de l'outil numérique correspondant du projet *La lumière en-chantée*.

Pourtant, bien des adultes peuvent faire appel à des raisonnements très « enfantins » lorsqu'on les confronte à une tâche ou un problème qui sort de leur domaine d'excellence, quand bien même ils ont déjà été formés au raisonnement logico-mathématique ; et nombreux sont les cas où les adultes se surprennent à donner une réponse fausse à une question simple dont ils connaissent la réponse. Ce qui prouve que l'assimilation et l'accommodation de connaissances nouvelles sont insuffisants pour dépasser des connaissances ou réflexes de pensée naïfs antérieurs. C'est notamment ce que Tversky et Kahneman ont montré dans leur article princeps de 1974 (*Judgment under uncertainty : heuristics and biases*), sur lequel nous reviendrons.

Comme nous l'analyserons plus en détail au paragraphe *6.3.2.2. Modes d'action*, on a ainsi pu voir, dans une séance d'accompagnement scientifique d'une enseignante de l'école primaire, un étudiant en sciences physiques - issu d'une école d'ingénieurs prestigieuse- expliquer le phénomène des saisons en faisant tout d'abord pointer l'axe de rotation de la terre vers le soleil puis, se rendant compte de son erreur, en le plaçant perpendiculairement au plan de l'écliptique… deux explications naïves que l'on retrouve à tous les âges. De même, à la question de la forme du croissant lunaire, adultes comme enfants répondent dans la plupart des cas « qu'elle est due à l'ombre portée de la Terre sur la Lune »…

Ces exemples montrent particulièrement bien les limites de l'idée d'une simple accumulation du savoir, car il n'y a aucun doute sur le fait que les interprétations exactes de ces deux phénomènes n'aient un jour été proposées à cet étudiant et aux adultes interrogés. Pourquoi alors dans certains cas répond-on faux, malgré les apprentissages antérieurs ? Pourquoi certains savoirs nouveaux se désagrègent-ils après quelques semaines ou quelques années pour être remplacés par les savoirs ingénus initiaux (Giordan & de Vecchi, 1987) ? La pédagogie constructiviste ne permet pas de répondre à ces questions ; elle reste donc très limitée pour comprendre les difficultés ou les erreurs et *a fortiori*, pour apporter les moyens d'y remédier.

[12] www.atomes-crochus.org/article12.html - Dernière consultation le 05/02/2013.

2.2.5. Le cas particulier des modèles de changement conceptuel[13]

Issue des travaux d'un groupe de scientifiques et chercheurs en éducation des sciences à l'Université de Cornell, la notion de « changement conceptuel » a été introduite et érigée en théorie par l'article *princeps* de Posner, Strike, Hewson et Gertzog en 1982 dans le cadre de l'enseignement de la physique (et en particulier de la théorie de la relativité). Inséré ensuite dans un cadre constructiviste par des auteurs comme von Glaserfeld (1989), il fut étendu à l'enseignement de la biologie par Dick et Carey en 1990 et fut employé dans de nombreuses études sur l'apprentissage et l'instruction dans des domaines non scientifiques (Guzetti & Hynd, 1998 ; Mason, 2001 ; Schnotz *et al.*, 1999 ; Vosniadou, 1994). Il fit ensuite l'objet de nombreux développements, dans la littérature anglo-saxonne notamment, s'appuyant sur des positions de différents ordres (épistémologique, ontologique, socio-affectif…).

Mais un autre modèle, développé indépendamment par Giordan (1989), s'appuie également sur l'idée de changement conceptuel : c'est le *modèle allostérique de l'apprendre*. Ces deux approches, toutes deux phénoménologiques, semblent suffisamment compatibles et proches pour qu'on puisse considérer qu'elles relèvent d'un même cadre théorique, bien que des différences notables, que nous décrirons ultérieurement, les distinguent.

2.2.5.1. L'école anglo-saxonne

De part ses bases théoriques initiales et du début de formalisation dont il a fait l'objet ultérieurement, le modèle anglosaxon du changement conceptuel s'apparente aux modèles scientifiques tels que nous les définissions plus haut. Prenant appui à la fois sur les travaux du psychologue Jean Piaget et du philosophe Thomas Kuhn, notamment à travers les idées respectives de « dissonance cognitive » (Piaget, 1969) et de « changement de paradigme » (Kuhn, 1970), il s'appuie fondamentalement sur l'idée selon laquelle l'apprentissage s'élabore sur la base de connaissances préalables : les idées préconçues des élèves, nommées dès le premier article -et en dépit d'un certain flou sur le sens des mots- « concepts », puis « conceptions ». Les développements ultérieurs de la théorie feront en outre une large place à l'échange entre les élèves ; le modèle appartient donc indéniablement à la tradition socioconstructiviste.

Constatant que les préjugés des apprenants pouvaient être extrêmement résistants au changement et que la théorie initiale ne tenait pas suffisamment compte des aspects sociaux et affectifs liés à l'apprentissage, plusieurs chercheurs ont formulé des critiques à l'encontre de la théorie – et notamment Pintrich, Marx et Boyle en 1993 avec la notion de « cold conceptual change », ce qui a conduit deux de ses auteurs à la reformuler sous la forme d'une « revisionist theory of conceptual change » (Strike & Posner, 1992).

Autour de la théorie initiale, qui vérifie elle-même les critères de changement conceptuel qu'elle propose, à savoir la nécessité pour une nouvelle conception d'être intelligible, plausible et féconde (Duit & Treagust, 2003), diverses écoles se sont formées, introduisant des nuances autour de l'idée de conflit cognitif : sont ainsi apparus le « generative learning model » (Osborne & Wittrock, 1985 ; Cosgrove & Osborne, 1985), le « ideational confrontation model » (Champagne *et al.*, 1985), ainsi que des modes opératoires pour enseignants tels que la « instructional strategy using anomalous data » (Chinn & Brewer, 1993). En 1992, Schaefer proposait à son tour une modélisation sous la forme d'un « zig-zag model ».

De par sa fécondité, la théorie du changement conceptuel continue d'avoir de nombreux prolongements, dont certains semblent s'éloigner fort, dans leur formalisation, de la théorie initiale. C'est le cas des modèles de Chi (le changement conceptuel comme changement ontologique, 1992),

[13] Les deux théories dont la description suit constitueront : pour la seconde, le cadre théorique de notre étude et pour la première, la grille d'évaluation de notre travail. Nous y reviendrons plus en détail dans la partie suivante.

Wittmann (2002) et diSessa[14] (*p-prims* et *coordination classes*, 1993), Vosnadiou (1994) et Balacheff (1995) (le problème de la cohérence chez l'apprenant). Nous y reviendraons dans la partie *6. Cadre théorique*.

2.2.5.2. L'école francophone

Parallèlement et apparemment indépendamment, des idées similaires allaient naître des travaux d'André Giordan. Avec son « modèle allostérique de l'apprendre » (Giordan, 1989), il allait lui aussi s'inspirer des théories existantes et de multiples recherches didactiques en matière d'éducation scientifique (Giordan & Martinand, 1988) pour construire une approche systémique de l'apprentissage.

Fondé sur l'héritage de Piaget et les travaux de Bachelard, le modèle allostérique de l'apprendre est lui-aussi d'inspiration constructiviste, au sens où il considère qu'un savoir ne s'élabore qu'en références aux connaissances déjà acquises par l'apprenant. Mais au regard des autres théories constructivistes, il insiste bien davantage sur l'idée d'accommodation des conceptions et du changement que cela implique pour l'apprenant. Ce faisant, il est plus proche du cadre théorique du changement conceptuel défini plus haut que du socioconstructivisme francophone et on peut le considérer comme un modèle de changement conceptuel (Bêty, 2010), en dépit de son développement indépendant.

Plus qu'accommoder le savoir, le modèle allostérique formule explicitement la nécessité de « déconstruire » les idées préconçues pour les dépasser, mais en s'appuyant sur elles plutôt qu'en les détruisant comme le préconisait Bachelard (1938). Il propose également une description approfondie de la notion de conception (Giordan, 1978 ; Giordan & Pellaud, 2004) un schéma général explicitant leurs transformations (Eastes & Pellaud, 2005), ainsi que des pistes pour expliciter la stabilité des conceptions initiales (Eastes & Pellaud, 2004b) comme l'ont fait Strike et Posner dans leur théorie révisée.

Lui-même extrêmement fécond, le modèle allostérique a surtout été utilisé pour construire des environnements didactiques et des stratégies pédagogiques, dans des domaines aussi divers que l'éducation scientifique, l'éducation thérapeutique, la sensibilisation au développement durable (Pellaud, 2000 ; Pellaud & Giordan, 2004) ou l'enseignement de l'équitation (Pellaud, 2002).

Autour d'André Giordan, plusieurs chercheurs continuent à le développer dans ces diverses directions, tentant d'une part de le formaliser davantage (c'est l'objet de notre travail actuel), d'autre part de l'adapter à des situations nouvelles et enfin d'en développer les aspects émotionnels, métacognitifs, infracognitifs et intentionnels (Golay *et al.,* 2010).

2.2.6. L'approche cognitive

Dans les années 90, la convergence de la psychologie cognitive et des recherches sur l'intelligence artificielle a contribué à faire émerger un domaine transdisciplinaire en grand développement, nourri par diverses disciplines telles que la neurophysiologie, la linguistique, la philosophie et des techniques performantes d'exploration des structures cérébrales : les sciences cognitives. S'étant donné l'esprit humain comme objet d'étude, elles sont naturellement amenées à s'exprimer sur la question des apprentissages.

Parmi tous ces domaines, c'est toutefois la psychologie qui a initié le recours à une conception « cognitive » de l'éducation, donnant naissance à des courants éducatifs éponymes. Née dans les années 50 en même temps que l'intelligence artificielle, elle est issue de la psychologie animale (Tolman, Krechevski, Brunswik), de la psychologie génétique, de la psychologie sociale (Lewin, Asch, Heider, Festinger) et de la *gestaltpsychologie*. Mais c'est au cours des années 80 qu'elle s'est

[14] http://edutech.csun.edu/eduwiki/index.php/DiSessa,_1983 - Dernière consultation le 05/02/2013.

véritablement installée, au travers de travaux sur les notions d'information et de traitement de l'information, qui permettaient enfin d'ouvrir la « boîte noire » du behaviorisme et de penser la cognition. Ce courant reste particulièrement vivace, comme en témoigne l'étude récente de Bransford *et al.* (2006) qui relate dix années de recherches en psychologie de l'apprentissage et leur impact sur les pratiques éducatives au Etats-Unis.

2.2.6.1. Les premières théories de psychologie cognitive dans l'éducation

- Le projet global

La psychologie cognitive étudie les grandes fonctions psychologiques de l'être humain que sont la mémoire, le langage, l'intelligence, le raisonnement, la résolution de problèmes, la perception ou l'attention ; elle part du principe que l'on peut inférer des représentations, des structures et des processus mentaux à partir de l'étude du comportement. Elle tente en particulier d'élucider les mécanismes de recueil, de traitement (image mentale, représentation), de stockage, de structuration et d'utilisation de l'information (Anderson, 1983 ; Gardner, 1987 ; Holland *et al.,* 1987 ; Bovet 1996).

Il s'agit ici de construire une connaissance de « ce qui se passe dans la tête » de l'individu lorsqu'il pense (activités motrices, perception, mémorisation, compréhension, raisonnement). Contre le béhaviorisme, elle défend l'idée que la psychologie est bien l'étude du mental et non du comportement, mais sans pour autant recourir à l'introspection pour explorer les états intérieurs de l'individu. Se fondant sur les résultats de ces recherches, diverses théories éducatives ont vu le jour, empruntant du même coup à ces recherches le qualificatif qui les caractérisaient.

- Les théories psycho- et sociocognitives

Les théories éducatives psychocognitives se préoccupent d'abord du développement des processus cognitifs chez l'apprenant, tels que le raisonnement, l'analyse, la résolution de problèmes, etc. Les fondements de ces théories éducatives se trouvent très souvent dans les recherches psychosociales (Moscovici, 1961 ; Perret-Clermont, 1979). C'est pourquoi elles mettent l'accent sur les paramètres interactifs dans le groupe-classe (McLean, 1988). Relativement proches des mouvements socioconstructivistes, elles insistent sur les aspects socialisés et contextuels de l'apprentissage (Doise et Mugny, 1981 ; Carugati & Mugny, 1985 ; Gilly, 1989) qui, suivant les auteurs, passera par des événements de type « conflit sociocognitif » (Joshua & Dupin, 1993), « pratique de groupe », « opposition de représentations » (Perret-Clermont, 1988).

D'autres courants insistent sur les facteurs culturels et sociaux intervenant dans la construction de la connaissance, mettant en avant les interactions sociales et culturelles qui façonnent l'évolution de la personne dans la société, ou s'interrogeant sur l'acte d'apprendre et insistant sur la coopération dans la construction des savoirs. Elles proposent alors une pédagogie coopérative (Augustine *et al.*, 1990) fondée sur les interactions entre apprenants au sein de travaux de groupe (Brandt, 1990 ; Kagan, 1990).

Les chercheurs de ces courants très dynamiques, notamment aux États-Unis (Slavin, 1990 ; Johnson et Johnson, 1990) et au Canada, s'interrogent également sur la domination du cognitivisme en recherche (Bandura, 1971 ; Joyce et Weil, 1972). Ils notent plus particulièrement les problèmes posés par une vision trop psychologique de l'éducation et insistent sur les conditions sociales et culturelles de la connaissance (Bandura, 1986 ; Lave, 1988).

2.2.6.2. Le cognitivisme (ou connexionnisme)

Avec le développement de l'intelligence artificielle et, plus généralement, des sciences cognitives, de nouvelles approches connexionnistes, issues du développement de la neurobiologie, commencent à proposer des bases cérébrales aux grandes fonctions cognitives. Le principe de base du connexionnisme consiste par exemple à décrire les phénomènes mentaux à l'aide de réseaux d'unités

simples et interconnectées. Les unités d'un réseau peuvent représenter des neurones et les connexions, des synapses.

Car l'objectif principal des sciences cognitives est justement de rendre compte de manière cohérente de l'ensemble des capacités cognitives de l'être humain, dans un vocabulaire uniforme qui n'est pas celui des neurosciences, mais celui de la psychologie (Andler, 2008), rendu plus austère par le recours exclusif à un petit nombre de concepts primitifs, dont les principaux sont *l'information* (en un sens abstrait et général), le *calcul* (une manipulation de l'information réalisable matériellement) et la *représentation* (comme dispositif de liaison entre l'agent cognitif et son environnement).

La notion de *système d'information* reste donc au cœur des modèles cognitifs, que ceux-ci adoptent des formalisations plutôt symboliques (la cognition vue comme un système de manipulation de symboles), plutôt connexionnistes (la cognition vue comme circulation d'activation dans un grand réseau de neurones), ou hybrides (notion d'un grand réseau de neurones qui réalise fonctionnellement un système de symboles).

Toutes ces théories sont aujourd'hui à un tournant, des liens étroits s'établissant avec la biologie, mêlant l'étude du système nerveux, de l'appareil immunologique ou du code génétique, mais aussi avec la linguistique, la sémiologie, l'informatique (système expert), la sociologie (épidémiologie des représentations) ou l'écologie cognitive. De par leur connexion avec les sciences expérimentales, elles tendent vers l'élaboration de modèles de pensée déterministes et non plus phénoménologiques ; c'est ce qui les distinguera le plus nettement de la didactique dans leur approche de l'apprentissage.

Car comme nous le verrons plus loin, des applications existent au niveau des apprentissages fondamentaux (lecture, écriture, calcul) et du traitement de leurs troubles (dyslexie, dysorthographie, dyscalculie), ainsi que dans la gestion de la motivation et de l'émotion. Toutefois, bien que prometteuses, les retombées dans l'enseignement restent faibles et les outils qui s'en inspirent encore trop souvent peu fondés (Goswami, 2006).

2.3. Pertinences relatives des modèles de l'apprendre

Il est possible de dire, au vu des limites des différentes pédagogies évoquées ci-dessus, que certaines sont plus adaptées que d'autres pour des types d'apprentissages et des objectifs pédagogiques donnés. Les élèves d'une classe primaire n'auront ainsi probablement pas retenu grand-chose du monologue du scientifique venu, l'espace d'une heure, présenter les derniers résultats de ses recherches en physique des particules en pensant avoir adapté son discours au niveau des enfants, comme nous avons pu l'observer lors d'une activité pédagogique organisée par le CERN (Genève) en 2003[15]. Mais à l'inverse, le conférencier qui souhaitera adopter une pédagogie socioconstructiviste face à une assemblée de 400 personnes se sera, espérons-le, armé de beaucoup de patience et aura prévu quatre heures de présence, plutôt qu'une seule comme à l'accoutumée ! Il apparaît également clairement que, dans le cadre d'un enseignement scientifique par exemple, la pédagogie socioconstructiviste est plus adaptée que les pédagogies empiriste et behavioriste, cette dernière étant, malgré ses limites indéniables, plus efficace que le cours magistral lorsqu'il s'agit d'apprendre un nouveau sport ou les travaux manuels.

Mais qu'en est-il des modèles dont ces pédagogies sont dérivées et peut-on établir entre eux une forme de hiérarchisation, relative à leurs présupposées « efficacités » pour décrire des situations éducatives données ?

2.3.1. Les articulations entre les modèles

Si différentes situations de transmission de savoirs s'accommodent mieux de certaines pédagogies que d'autres, il n'en demeure pas moins qu'en ce qui concerne les apprentissages scolaires, une certaine

[15] Notes personnelles.

hiérarchie existe au sein des traditions pédagogiques que nous avons présentées. On conçoit aisément aussi que si de nouveaux modèles ont été proposés, c'est parce que les anciens étaient insuffisants.

Un retour sur les exemples proposés plus haut pour illustrer les cas particulièrement bien décrits par ces différents modèles offre un début de réponse : si les premiers apprentissages d'un champ disciplinaire ou d'une activité (repensons au nourrisson) sont bien rendus par le modèle empiriste et complètement explicités par certains modèles cognitifs récents, les sensations et ressentis du modèle behavioriste sont nécessaires pour l'apprentissage de gestes et de réflexes un peu plus élaborés. Lorsque la pratique de l'activité se complexifie encore, l'appel à la raison (puis aux interactions sociales) est nécessaire pour progresser, c'est-à-dire organiser et relier ses nouveaux savoirs. La référence aux modèles constructiviste et socioconstructiviste est alors requise.

2.3.2. La métaphore de la maison

Francine Pellaud (Eastes & Pellaud, 2005) invoque à cet effet la « métaphore de la maison », où les pièces de l'édifice en cours de création sont assimilées aux éléments du savoir en cours d'élaboration. Ainsi dans une étape primitive, les premières pierres sont posées à même le sol, s'y enfonçant légèrement et s'y ancrant plus ou moins bien. Dans la métaphore, leur placement est donc « empiriste ». Puis viennent les premières couches de pierres ; celles qui sont placées en position instable retombent sur le sol, celles qui s'ajustent particulièrement bien aux autres s'y imbriquent plus ou moins solidement ; c'est l'étape behavioriste. Arrive alors le moment de mettre en place des murs droits et solides ; les nouvelles pierres ne peuvent être placées n'importe où et le maçon les pose aux endroits qui semblent les plus adaptés. Plus question à ce stade de les empiler sans précaution, elles doivent être solidement jointes les unes aux autres ; il est donc parfois nécessaire d'en déplacer certaines, déjà posées.

Mais une fois la maison construite, les murs montés et les ouvertures percées, il est parfois nécessaire d'en réviser les plans : déplacer une cloison, boucher une fissure, agrandir une porte ou consolider le toit… Il n'est pas envisageable de tout démonter car, à ce stade de la construction, l'habitation est déjà utilisée et c'est la seule dont les propriétaires disposent pour s'abriter ! Il faut alors « faire *avec* pour aller *contre* », selon l'expression de Giordan (1998), c'est-à-dire modifier l'habitation depuis l'intérieur, en étayant certains endroits pendant la durée des travaux : c'est l'étape « allostérique », qui demande un investissement important, presque une préparation psychologique, et qui nécessite d'entrevoir la perspective d'un confort meilleur ou d'une esthétique améliorée. Bien entendu, il sera plus facile de changer une tuile que de déplacer un mur porteur ou d'intervenir sur les fondations ; c'est ce qui fait toute la différence entre les apprentissages nouveaux et ceux qui nécessitent d'intervenir sur des bases solides acquises parfois lors de l'enfance.

Dans le cadre de cette métaphore, que deviennent les autres traditions éducatives ? Beaucoup des théories évoquées plus haut ne concernent pas les processus d'apprentissage mais rassemblent des réflexions d'ordres architectural et urbanistique ; elles traitent de manière générale de ce que l'on doit attendre d'une maison, des matériaux et des outils à utiliser, des places de jeux et des commodités, des justes proportions et de l'homogénéité des lotissements. Toutes ces réflexions, bien entendu, véhiculent en général des idées implicites et inconscientes sur la manière dont on construit les maisons. On touche là, certes, aux limites de la métaphore mais cette dernière nous permet de nous rendre compte de la différence entre ce que nous avons appelé « modèles d'enseignement » ou « théories éducatives » et les modèles scientifiques d'apprentissage qui nous intéressent.

Reste à tenter d'inclure dans la métaphore les modèles issus des sciences cognitives. Les techniques d'analyse expérimentale telles que la neuroimagerie cérébrale ou les mesures de potentiels évoqués permettent de voir littéralement « à travers les murs », de comprendre la nature des matériaux, la répartition des tensions, la circulation des fluides et les ponts thermiques… Connaissant les propriétés du ciment, la manière dont il prend et son évolution à long terme, elles peuvent préconiser l'emploi de

telle formule plutôt que de telle autre. Elles convoquent enfin une palette immense de spécialistes de diverses disciplines qui, chacun, peuvent éclairer avec précision et sophistication une caractéristique de l'habitation.

Mais du point de vue de l'enseignant, ce sont les modèles phénoménologiques opératoires et intelligibles qui seront les plus utiles dans sa pratique quotidienne.

2.3.3. Un modèle pour chaque degré d'élaboration du savoir

Ainsi, les différents modèles évoqués plus haut seraient utilisables pour décrire différents stades de l'élaboration d'un savoir. Comme nous venons de le sous-entendre avec la métaphore de la maison, l'existence de plusieurs modèles de l'apprendre ne signifie pas que les plus anciens soient véritablement « faux », ni que les pédagogies associées puissent être qualifiées de « mauvaises ». Chacun de ces modèles est simplement plus ou moins adapté pour décrire et expliciter une situation pédagogique donnée : *modèle empiriste* pour la conférence magistrale, *modèle behavioriste* pour l'apprentissage de gestes techniques, *modèle constructiviste* pour les séances de type *Main à la Pâte* ou *Hands on*, *modèle socioconstructiviste* pour le café des sciences…

Or pour des apprentissages plus élaborés, les limites de la pédagogie constructiviste rendent nécessaire l'élaboration d'un modèle plus performant encore. Sans nier que les connaissances s'acquièrent dans un certain ordre, ce modèle ne devra pas uniquement s'appuyer sur l'acquisition « par construction progressive » de structures mentales opératoires, dépendante d'une évolution neurobiologique. C'est ce qui constitue le fondement principal du modèle allostérique que nous approfondirons plus loin.

2.3.4. Influence de la situation pédagogique sur le modèle interprétatif

Lorsque le modèle est employé dans une optique interprétative, il convient d'apporter à cette analyse une nuance supplémentaire : le modèle qui décrit le mieux une situation éducative donnée est relatif non seulement à la pédagogie proposée par l'enseignant, mais relatif également à l'apprenant lui-même. En effet, pour une situation donnée, divers apprenants sont susceptibles de se trouver dans ce que nous appellerons pour simplifier des « dispositions » très différentes. Qu'il s'agisse de leurs prédispositions au sujet traité, de leurs connaissances préalables, de leur état de fatigue ou de motivation, nombreux sont les paramètres qui feront varier leur attention, ainsi que leur volonté ou leur capacité à s'investir dans l'apprentissage proposé.

Ainsi lors d'un cours *ex cathedra*, relevant manifestement d'une pédagogie empiriste, tel élève se contentera comme on s'y attend de prendre machinalement des notes sous la dictée de l'enseignant. Mais rien n'empêchera tel autre, plus motivé, de tenter de comprendre le cours au fur et à mesure et de le confronter en permanence à ses connaissances acquises précédemment. Si en outre il compare les textes de son livre ouvert sur son pupitre aux dires du professeur, si ce dernier accepte qu'il échange avec son voisin ou consulte *Wikipedia* sur son smartphone, il pourra parfaitement se trouver, individuellement et localement mais volontairement, dans une situation parfaitement décrite par le *modèle socioconstructiviste*. Et cela, bien que la forme du cours n'y soit pas particulièrement favorable. Il en va de même du lecteur d'un livre qui ne se contenterait pas de survoler les passages difficiles, mais qui annoterait le texte, referait activement les démonstrations, noterait les questions qui lui viendraient à l'esprit en vue d'en discuter plus tard avec ses amis, etc.

A l'inverse, une situation de type *Main à la Pâte*, *a priori* bien décrite par le *modèle socioconstructiviste*, peut très bien « dégénérer » en séance empiriste pour l'élève isolé au fond de la classe, fatigué et désintéressé du sujet, qui se contente de recopier le tableau dans son cahier, pour le relire le soir chez lui. Cette prise de notes et cette lecture inactives auront alors en effet transformé la séance se voulant relever d'une pédagogie socioconstructiviste en un cours totalement empiriste.

Pour reprendre la métaphore de la maison évoquée plus haut, le maçon fatigué ou démotivé pourra ainsi très bien bâtir les murs d'une maison de manière « pseudo-empiriste », en empilant les pierres sans grande attention. Mais un autre jour, son zèle et sa passion pourront également tout à fait l'amener à agencer les premières pierres avec minutie, voire à creuser des fondations profondes pour bâtir des murs souterrains !

Ainsi, l'état de l'apprenant a une influence sur le modèle qui permettra de décrire son apprentissage, quelle que soit la pédagogie choisie. On réalise par suite que, si une pédagogie peut découler d'un modèle particulier, explicite ou implicite, la détermination du modèle qui décrit la progression d'un apprenant dans une situation éducative n'est pas uniquement liée à la pédagogie proposée par le médiateur (auteur, enseignant, vulgarisateur ou formateur). Plus précisément, il est déterminé par l'interaction de cette pédagogie avec les *dispositions* dans lesquelles se trouve l'apprenant. Bien entendu, outre la responsabilité du choix de la situation éducative, le médiateur a potentiellement le pouvoir d'agir sur ces dispositions, notamment en suscitant la motivation et l'intérêt pour son sujet.

Médiateur
Pédagogie
Situation éducative
Apprenant
Disposition

Tout l'art de la médiation et de l'enseignement consistera donc non seulement à proposer une pédagogie efficace au regard des apprentissages qu'il souhaitera induire, mais également à tenter d'amener la plupart des élèves dans des dispositions propres à les élever dans une relation au savoir proposé décrite par le modèle le plus efficace possible (figure 11).

Ce constat est apparemment évident pour quiconque a déjà eu l'opportunité d'enseigner. Il apporte pourtant un élément crucial dans la recherche d'une activité de médiation de qualité : la nécessité d'un environnement didactique proposant des approches pédagogiques aussi diversifiées que possible (de manière à toucher tous les apprenants), mais également tenant compte des paramètres propres à susciter l'implication active des élèves dans le cours. Les paramètres en question seront discutés ultérieurement dans cette étude, dans le cadre de la proposition d'environnements didactiques complets.

MODELE

Eastes, 2005

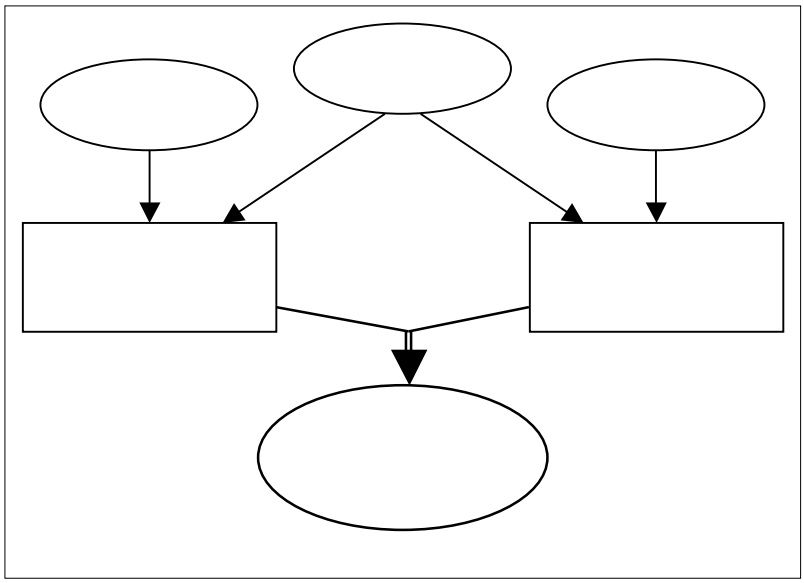


Figure 11 : Détermination du modèle de l'apprendre propre à l'explicitation de l'apprentissage d'un apprenant dans une *disposition* particulière, dans une situation éducative et pour une pédagogie données.

Pour résumer, on retiendra qu'un mode pédagogique particulier, correspondant à une pédagogie donnée et découlant d'un modèle d'apprentissage bien identifié (explicite ou implicite) pourra, selon la « disposition d'esprit » de l'apprenant, produire des apprentissages qui sont décrits par des modèles d'apprentissage différents. Un exemple de ce phénomène a été décrit au paragraphe *2.2.3.3. Caractéristiques des pédagogies dérivées*.

Ces grandes tendances en matière de théories éducatives et modèles d'apprentissage, ainsi que l'étude de leurs pertinences relatives dans l'éducation, permettent désormais d'y situer, préciser et développer le cadre théorique dans lequel s'inscrira la suite de notre travail.

3. CADRE THEORIQUE ET PRATIQUE

« Le difficile n'est pas d'apprendre ce qu'on ne sait pas, c'est d'apprendre ce qu'on sait »

Jacques Salomé (1990), psychologue et écrivain français.

3.1. Justification du cadre théorique

Comme nous l'avons écrit plus haut, nous souhaitons privilégier dans ce travail l'étude de modèles d'apprentissage scientifiques, susceptibles de retombées en termes d'applications pédagogiques, plutôt que de considérer la multitude de théories éducatives qui, indépendamment de leur pertinence, ne font que s'appuyer sur des modèles d'apprentissage implicites ou partiellement explicités.

A cet égard, parmi l'ensemble des théories décrites dans la partie précédente (*2. Etat de la question*), et hormis les modèles issus des neurosciences que nous discuterons plus loin, deux approches seulement nous semblent vérifier les critères de scientificité et de fécondité que nous recherchons : la *théorie du changement conceptuel* et le *modèle allostérique de l'apprendre*.

Le choix du second comme matériau principal s'inscrit certes dans la tradition de notre laboratoire ; mais il nous semble également plus apte à supporter à la fois une formalisation opératoire et des prolongements innovants que la première approche, notamment de par les descriptions plus élaborées qu'il fait de la notion de « conceptions » et des conditions de leurs transformations. La théorie du changement conceptuel, bien que moins approfondie sur certains aspects théoriques, est quant à elle suffisamment développée, commentée et admise, notamment dans la littérature anglo-saxonne, pour constituer un cadre théorique comparatif fiable. Elle sera donc utilisée pour confirmer les caractéristiques nouvelles que nous apporterons au modèle allostérique, sans que cela ne préjuge de l'éventualité de voir émerger des contradictions entre les deux modèles ; le cas échéant, ces dernières devront être clarifiées et les arguments nouveaux justifiés.

Nous ne pourrons certes pas négliger les apports des sciences cognitives relatifs aux apprentissages spontanés et simples (psychologie et physique naïve : Dehaene, Spelke *et al.,* 1999 ; langage : Christophe, 2008 ; représentation des quantités : Dehaene, 1997b…), qui constitueront des bases théoriques robustes incontournables pour ancrer et/ou éprouver notre modélisation. Toutefois, conformément à notre problématique de départ (l'enseignement et la médiation scientifiques), nous ne souhaitons nous pencher que sur les apprentissages complexes, correspondant aux niveaux scolaires primaire ou plus et portant sur l'acquisition de connaissances, compétences et méta-savoirs scientifiques. Un domaine dans lequel elles sont encore relativement silencieuses. Les résultats des sciences cognitives constitueront ainsi davantage un guide et un moyen de contrôle de notre modèle, qui deviendra plus formel mais restera phénoménologique, par la confrontation avec les résultats expérimentaux réalistes relatifs aux structures cérébrales. La philosophie des sciences sera quant à elle utilisée pour nourrir notre modélisation par ses apports en matière de description et de compréhension de la pensée.

3.2. La théorie du changement conceptuel

Un exemple d'application de la théorie du changement conceptuel est décrit dans le film éducatif *A Private Universe* (Pyramid Film & Video, 1988) ; il est également rappelé par John Davis sur son site de l'Université de Géorgie (2001). Nous nous proposons de le reprendre dans l'encadré qui suit avant de l'utiliser pour présenter les avantages et limites de cette approche. Cet exemple est d'autant plus intéressant que nous en réutiliserons ultérieurement la thématique dans notre propre étude.

3.2.1. Illustration pratique du changement conceptuel

Imagine the following scenario

Heather, a very bright ninth grader, is asked to explain the mechanisms causing the seasons and the phases of the moon. She has received no formal instruction on these topics in her ninth grade earth science class although these topics were covered in science lessons from earlier grades. In her explanations, Heather demonstrated some misconceptions. For example, she believes that the earth orbits the sun in a bizarre curlicue pattern and that the seasons are caused by the proximity of the earth to the sun at different points along the orbit.

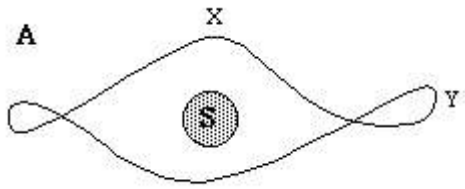


Figure 12 : *Graphic representation of Heather's misconception regarding the 4 seasons. It shows a "curlicue" path around the sun.*

She explains that when the earth is closest to the sun at point X, it is winter in the northern hemisphere because the light rays from the sun hitting the earth are "indirect." Heather says that when the earth is at point Y, it is summer because the light rays hitting the northern hemisphere are "direct." She goes on to explain that direct rays are those that originate from the sun and travel in a straight line to the earth, and that indirect rays are rays that "bounce off" somewhere in space before reaching earth. To explain the phases of the moon, Heather explains that the shadow of the earth on the moon is the cause (Mestre, 1994).

L'explication qu'Heather donne des saisons contient un mélange d'idées correctes et incorrectes. La notion de lumière directe et indirecte qu'elle convoque explique bien, en partie, pourquoi il y a des saisons, mais l'idée qu'elle se fait de l'orbite terrestre est fausse. Les constructivistes reconnaissent en effet que, comme Heather, tout étudiant entre dans la salle de classe riche de connaissances sur son monde physique, biologique et social. Il construit ses propres idées sur la façon dont le monde fonctionne et explique les phénomènes en fonction de ces idées. Ces idées préconçues sont alors appelées « croyances naïves » ou « conceptions alternatives », car elles correspondent rarement aux explications scientifiques enseignées en cours de science.

Mais analysons grâce à Heather ce qui se produit ensuite, lorsque l'enseignement est « appliqué » sur ces conceptions erronées.

In her earth science class, Heather receives formal instruction explaining the causes of both the seasons and the phases of the moon. Two weeks after instruction begins, Heather is asked the same questions in another interview.

Instruction has helped Heather overcome several of her misconceptions. For example, Heather has revised her theory about the curlicue path of the earth around the sun. She now explains that the earth follows a nearly circular path around the sun. Furthermore, instruction has also changed Heather's belief that the seasons are caused by the proximity of the earth to the sun; she now knows that the earth is approximately the same distance from the sun throughout the year. She illustrates by drawing a diagram

that the seasons are caused by the tilt in the earth's axis, which causes direct and indirect light to fall on the northern and southern hemispheres of the earth.

However, when asked to explain what she means by "direct" and "indirect" light, Heather resorts to her previous beliefs. She says that indirect light is light that bounces off points in space--similar to light reflecting off a mirror-- before hitting the earth. Even a strong hint from the interviewer and a display of diagrams illustrating the differences between direct and indirect sunlight does not change Heather's mind; she incorporates the hints into her erroneous conception by saying that the indirect light from the sun, which also causes winter in the northern hemisphere, is light that bounces off some other point on the earth before reaching the northern hemisphere (Mestre, 1994).

In the past, Heather's prior knowledge of the reflection of light may have facilitated learning certain concepts in physical science. In this case, however, the same prior knowledge interferes with learning.

Selon Davis, l'histoire d'Heather illustre parfaitement le processus d'apprentissage appelé *changement conceptuel*. Bien que les conceptions d'Heather ne s'alignent pas complètement avec l'explication scientifique, un changement majeur se produit en effet dans sa compréhension de ce qui cause les saisons.

Le changement conceptuel est généralement défini comme un apprentissage qui modifie ou restructure les conceptions préexistantes (les croyances, idées ou façons de penser) ; c'est ce qui le distingue d'autres formes d'apprentissage. Apprendre n'est pas simplement accumuler de nouvelles données ou développer un nouveau savoir-faire. Dans le changement conceptuel, une conception existante est fondamentalement changée, ou même remplacée, et devient le cadre conceptuel que les élèves utilisent pour résoudre des problèmes, expliquer un phénomène et évoluer dans leur monde.

Davis fait remarquer que les conceptions erronées ne prévalent pas uniquement parmi les enfants en âge scolaire et que, même après plusieurs années, les adultes conservent des idées fausses sur des phénomènes scientifiques simples. C'est ce que dévoile une séquence de *A Private Universe* dans laquelle des étudiants fraîchement diplômés d'Harvard, ainsi que leurs professeurs, ont fourni des théories présentant des similitudes avec celles d'Heather lorsqu'il leur a été demandé d'expliquer les phases de la lune.

3.2.2. Bases théoriques de l'approche dite du « changement conceptuel »

3.2.2.1. Origine historique

L'origine de la théorie du changement conceptuel a été décrite plus haut, dans la section *2.2.5. Le cas particulier des modèles de changement conceptuel*. Elle s'appuie à la fois sur les travaux de Piaget et de Kuhn, rapprochant assez instinctivement le phénomène individuel de « dissonance cognitive » avec celui des « révolutions scientifiques ». Selon Kuhn, ces dernières ont lieu lorsqu'un paradigme scientifique dominant – une façon basique de percevoir, de penser, d'apprécier et de faire – tombe dans un « état de crise » en échouant à apporter des solutions ou des explications pour traiter des problèmes significatifs identifiés par la communauté scientifique (Harmon, 1970). Un paradigme alternatif, contenant le potentiel nécessaire pour résoudre ces problèmes émerge alors, s'il est disponible. L'existence de ces deux conditions accroit alors la probabilité d'un « changement de paradigme » ou l'adoption universelle d'un nouveau schéma de pensée.

La théorie initiale (Posner *et al.,* 1982), à bien y regarder, relève davantage de l'intuition fulgurante opérée par le rapprochement de réflexions pédagogiques avec la théorie féconde et inspirante de Kuhn que d'une véritable élaboration théorique fondée sur l'observation expérimentale. Bien des arguments sont d'ailleurs étrangement appuyés par l'expression « *we believe that* », qui laisse la désagréable impression d'absence de scientificité, bien que les auteurs semblent honnêtes et sincères. Le fait qu'elle ait ensuite eu le succès qu'on lui connaît dans le monde anglo-saxon est peut-être dès

lors le signe du vide théorique qui a pu exister ces dernières décennies dans le domaine de la compréhension de l'apprentissage. Toujours est-il que cette théorie initiale présentait certaines caractéristiques intéressantes.

3.2.2.2. Caractéristiques de la théorie initiale

L'article princeps évoqué ci-dessus (Posner *et al.,* 1982) commence par rappeler l'ancrage constructiviste de la théorie : « *It has become a commonplace belief that learning is the result of the interaction between what the student is taught and his current ideas or concepts* ». Mais il signale aussi l'incapacité des travaux précédents à interpréter la manière dont les idées d'un étudiant interagissent avec de nouvelles idées incompatibles. Et les auteurs ajoutent « *There has been no well-articulated theory explaining and describing the substantive dimensions of the process by which people's central, organizing concepts change from one set to another set, incompatible with the first* ». C'est alors qu'ils invoquent la « *philosophy of science* » qui, dans la tradition française, doit être entendue comme l'épistémologie et non pas comme la philosophie des sciences.

Selon les auteurs, l'apprentissage procède d'un changement conceptuel dont la description est très analogue à la théorie des révolutions scientifiques de Kuhn ou à celle des noyaux durs et des programmes de recherche de Lakatos (1976). La période de « science normale » de Kuhn est comparée à l'*assimilation* de Piaget, alors que la « révolution scientifique » est analogue à la phase d'*accommodation*. Le changement de paradigme est, dans ce cas, dû à un « conflit cognitif », c'est-à-dire à la confrontation brutale entre les idées de l'élève et/ou avec l'expérience, comme déclencheur du changement : « *We believe that inquiry and learning occur against the background of the learner's current concepts* ».

C'est alors qu'intervient la notion d'écologie conceptuelle empruntée à Toulmin (1972), définie comme « *those concepts which govern a conceptual change* ». Elle s'accompagne de la question: « *What kind of concepts tend to govern the process of accommodation?* ».

C'est ce qui conduit les auteurs à formuler leur « théorie de l'accommodation » (selon leurs propres termes) sous la forme des réponses à ces deux questions :

- « *Under what conditions does one central concept come to be replaced by another?* »
- « *What are the features of a conceptual ecology which govern the selection of new concepts?* »

Probablement à cause de sa dénomination maladroite, la notion d'*écologie conceptuelle* sera fortement critiquée par la communauté scientifique, comme nous le verrons plus loin. Elle présente toutefois l'avantage de mettre l'accent sur l'aspect dynamique de l'organisation des conceptions.

S'appuyant sur les travaux de Lakatos (1976), qui montrent qu'une théorie est d'avantage acceptée parce qu'elle résout les questions courantes que grâce à sa capacité à générer des prédictions, les inventeurs du changement conceptuel émettent alors l'hypothèse forte suivante : « *Central concepts are likely to be rejected when they have generated a class of problems which they appear to lack the capacity to solve. A competing view will be accepted when it appears to have the potential to solve these problems and to generate a fruitful line of further research* ».

En découlent quatre conditions nécessaires à l'apprentissage, que nous reproduisons ci-dessous dans la mesure où elles nous semblent concentrer l'essentiel de la théorie initiale du changement conceptuel.

« *1) There must be **dissatisfaction** with existing conceptions. Scientists and students are unlikely to make major changes in their concepts until they believe that less radical changes will not work. Thus, before an accommodation will occur, it is reasonable to suppose that an individual must have collected a store of unsolved puzzles or anomalies and lost faith in the capacity of his current concepts to solve these problems.*

*2) A new conception must be **intelligible**. The individual must be able to grasp how experience can be structured by a new concept sufficiently to explore the possibilities inherent in it. […]*

*3) A new conception must appear initially **plausible**. Any new concept adopted must at least appear to have the capacity to solve the problems generated by its predecessors. Otherwise it will not appear a plausible choice. Plausibility is also a result of consistency of the concepts with other knowledge. A new idea in, say, astronomy is less likely to be accepted if it is inconsistent with current physical knowledge or if it simply has no clear physical account. […]*

*4) A new concept should suggest the possibility of a **fruitfull** research program. It should have the potential to be extended, to open up new areas of inquiry* ».

Traduites en termes pédagogiques ces conditions impliquent qu'une nouvelle conception proposée par un enseignant, après avoir montré les limites de la conception initiale, doit autant que possible être *intelligible*, *plausible* et *féconde*.

A propos de la condition 1, les auteurs notent de manière intéressante que, si le conflit cognitif a été largement développé dans le cadre Piagétien, leur approche est la première qui soit « *focused on fundamental changes in a person's central, organizing concepts from one set of concepts to another set incompatible with the first* ». Toujours sur des bases épistémologiques, ils développent alors ce qui leur semblent être les caractéristiques importantes de l'écologie conceptuelle, sorte de système de « médiation » de l'intelligibilité, de la plausibilité et de la fécondité des conceptions, qui mêlerait anomalies, analogies et métaphores, conceptions épistémologiques, croyances métaphysiques et autres savoirs. Ils terminent en illustrant les paramètres de leur théorie par une étude expérimentale sur l'enseignement de la théorie de la relativité.

3.2.2.3. Principales critiques formulées à l'encontre de la théorie initiale

Une critique majeure de la théorie du changement conceptuel initiale a porté sur son approche de l'apprentissage par l'élève qui accordait à ce dernier une pensée logique et trop rationnelle. Dans l'article de 1982, les auteurs écrivent en effet : « *Learning is a central activity. That is, learning is fundamentally coming to comprehend and accept ideas because they are seen as intelligible and rational. Learning is thus a kind of inquiry. The student must make judgments on the basis of available evidence* ». L'objection est certes pertinente, mais elle ne s'attarde pas sur le fait que la théorie de Posner *et al.* s'appuyait sur une approche épistémologique dont on aurait pu critiquer la propre conception rationnelle de l'évolution de la connaissance scientifique. Probablement était-il plus difficile de s'en prendre à Kuhn qu'à Posner, surtout à cette époque où la vision de la science de Kuhn n'avait pas encore commencé à être remise en question (Weinberg, 1999).

C'est ce qui conduisit Pintrich, Marx et Boyle à introduire la notion de « changement conceptuel froid » (1993), qui ignore les aspects affectifs (motivation, valeurs, centres d'intérêt) et les composantes sociales qui entrent en jeu lors de l'apprentissage. La notion d'*écologie conceptuelle* a été notamment sévèrement critiquée pour n'être centrée que sur le processus cognitif de l'apprenant, et non sur l'apprenant dans sa globalité, et pour ne pas avoir pris en compte les interactions de l'apprenant avec ses éventuels interlocuteurs (professeur, autres élèves) dans l'environnement d'apprentissage. Il est en effet fort probable que ce dernier influence l'écologie conceptuelle de l'apprenant, influençant par là le changement conceptuel lui-même. Une critique qui, en revanche, ne saurait être formulée à l'égard du modèle allostérique de l'apprendre.

3.2.2.4. La théorie révisée de Strike et Posner

Strike et Posner (1992), acceptant de reconnaître ces carences, reformulèrent alors la théorie sous la forme d'une « revisionist theory of conceptual change », se laissant notamment influencer par les

perspectives socioconstructivistes d'alors (Hewson, Beeth et Thorley, 1998) et affinant leurs concepts.

En premier lieu, ils étendirent l'idée initiale d'*écologie conceptuelle* pour y inclure les objectifs et les motivations de l'apprenant, qui ne peuvent pas être tous reliés à de simples facteurs épistémologiques (que l'on pense par exemple à la motivation que suscite la peur d'obtenir une mauvaise note). Dans leur article de 1992, on lit notamment : « *This theory of conceptual change is embedded in a set of epistemological assumptions that are far more generalizable than our application to misconceptions has exploited. These epistemological assumptions suggest that the basic problem of understanding cognitive development is to understand how the components of an individual's conceptual ecology interact and develop and how the conceptual ecology interacts with experience* ». Sur cette base, Ruhf (2003[16]) reformule l'idée d'écologie conceptuelle en la présentant comme un contexte cognitif particulier constitué de « *cognitive artifacts, including anomalies, analogies, metaphors, epistemological beliefs, metaphysical beliefs, knowledge from other areas of inquiry, and knowledge from other areas of competing conceptions* ». C'est également ce qui fera dire à Pintrich *et al.* (1993) que le changement conceptuel est « *plus qu'un changement de concepts* » (Duit & Treagust, 2003), et à Özdemir & Clark (2007) que : « *From a conceptual ecology perspective, the constituent ideas, ontological categories, and epistemological beliefs highly influence a learners interactions with new ideas and problems* ».

En second lieu, les conceptions des élèves étaient originellement vues comme des objets auxquels l'*écologie conceptuelle* s'appliquait ; Strike et Posner les reconnurent cette fois comme faisant elles-mêmes partie de l'écologie conceptuelle. Özdemir & Clark écrivent notamment à ce propos (2007) : « *Misconceptions are […] not only inaccurate beliefs; misconceptions organize and constrain learning in a manner similar to paradigms in science* ». Une idée que l'on trouve également dans le modèle allostérique, Giordan (2000) indiquant que les conceptions sont le seul outil à la disposition de l'individu pour appréhender le monde, et sont donc propres à en déformer la perception lorsqu'elles sont erronées plutôt qu'à se transformer elles-mêmes.

La notion d'*écologie conceptuelle* ainsi revisitée et précisée allait par la suite servir de base à de nouveaux courants dans la recherche sur le changement conceptuel, que nous décrirons plus loin.

3.2.2.5. Définition actuelle de la théorie du changement conceptuel

Compte tenu de sa notoriété, l'expression « changement conceptuel » a fini par être employée dans une relativement grande variété de sens dans la littérature, de sorte que le terme « changement » a souvent été utilisé comme synonyme de « *exchange of pre-instructional conceptions for the science concepts* » (Duit & Treagust, 2003). Nous préférons suivre Duit (1999) en nous ralliant à une définition qui consiste à utiliser le changement conceptuel pour désigner les apprentissages « *in such domains where the pre-instructional conceptual structures of the learners have to be fundamentally restructured in order to allow understanding of the intended knowledge, that is, the acquisition of science concepts. In a general sense, conceptual change denotes learning pathways from students' pre-instructional conceptions to the science concepts to be learned* ». L'analyse la plus commune, selon Duit et Treagust (2003), consiste à considérer qu'il existe deux types de changement conceptuel, nommés :

- *Assimilation*, restructuration faible du savoir, ou capture conceptuelle ;
- *Accommodation*, restructuration forte (ou radicale) du savoir, ou échange conceptuel.

Certains auteurs séparent en outre l'*accrétion du savoir* et le *changement conceptuel*, alors que d'autres placent la première en amont du second (Harrison & Treagust, 2000) ; une option que nous adopterons nous aussi ultérieurement, nous sans considérer que la réalité observable est en général plus facile à décrire par un continuum ou comme un hybride entre les approches « pures » définies par les théoriciens.

---

16 www.x98ruhf.net/conceptual_change.pdf - Dernière consultation le 05/02/2013.

3.2.3. Le changement conceptuel appliqué à l'éducation

Comme le rappelle Davis (2001), le processus de changement conceptuel n'est pas spontané : « *Learner preconceptions are resistant to change. Because learners have relied on these existing notions to understand and function in their world, they may not easily discard their ideas and adopt a new way of thinking. Thus, simply presenting a new concept or telling the learners that their views are inaccurate will not result in conceptual change. Teaching for conceptual change requires a constructivist approach in which learners take an active role in reorganizing their knowledge. Cognitive conflict strategies, derived from a Piagetian constructivist view of learning, are effective tools in teaching for conceptual change (Duit, 1999). These strategies involve creating situations where learners' existing conceptions about particular phenomena or topics are made explicit and then directly challenged in order to create a state of cognitive conflict or disequilibrium* ».

Le conflit cognitif a été utilisé comme base pour développer de nombreux modèles et stratégies permettant de dépasser cet obstacle et d'enseigner selon la théorie du changement conceptuel. Bien que ces modèles suggèrent des méthodes et techniques variées, elles partagent une structure similaire à la stratégie de changement conceptuel proposée par Nussbaum et Novick (1982) :

1) Découvrir les conceptions préalables des élèves.
2) Discuter et évaluer les conceptions préalables.
3) Créer un conflit conceptuel avec ces conceptions préalables.
4) Encourager et guider la restructuration conceptuelle.

Ces étapes sont discutées ci-dessous.

3.2.3.1. Découvrir les conceptions préalables des élèves

Une affirmation courante en matière de changement conceptuel est la suivante : « *l'idée clef du constructivisme est que la construction des nouvelles conceptions (l'apprentissage) n'est possible que sur la base de conceptions existant déjà* » (Duit, 1999, p. 275). Bien que les connaissances existantes (qu'elles soient correctes ou incorrectes) aident l'apprenant à frayer son chemin dans le monde, il n'en est pas nécessairement conscient. Ainsi le premier pas, et le plus significatif dans l'apprentissage, consiste à faire en sorte que les élèves se rendent compte de leurs propres idées sur le sujet ou le phénomène étudié.

Ces derniers peuvent représenter leurs idées de multiples façons : en écrivant des descriptions, en produisant des illustrations, en créant des modèles physiques, en dessinant des cartes conceptuelles, en imaginant des pages web ou en créant n'importe quelle combinaison de ces moyens pour mettre en évidence leur compréhension d'un concept donné. Si des ordinateurs et les logiciels adaptés sont disponibles, les élèves peuvent développer des présentations, créer des modèles ou des simulations, construire des cartes conceptuelles numériques... Quelle que soit la méthode, l'objectif de cette étape est d'aider les élèves à reconnaître et à commencer à clarifier leurs propres idées et compréhensions. Une fois que les conceptions des élèves ont été explicitées, les enseignants peuvent alors en principe les utiliser comme base pour continuer leur instruction.

3.2.3.2. Discuter et évaluer les conceptions préalables

L'objectif de cette deuxième étape est de faire en sorte que les élèves clarifient et révisent leurs conceptions originelles par le biais de discussions en petits groups et en classes entières (Stepans, 2009). Typiquement, le professeur demande pour commencer à plusieurs élèves de décrire leurs représentations (conceptions). Une fois toutes les conceptions présentées, le professeur amène la classe à évaluer chacune d'entre elles pour déterminer si elle est intelligible, plausible et féconde quand il s'agit d'expliquer le cas exposé.

Nussbaum et Novick (1982) conseillent au professeur d'accepter toutes les représentations et de se retiennent de tout jugement de valeur. Le professeur devrait également mentionner les représentations en utilisant le nom de l'élève, en disant par exemple : « *Qui pense que le dessin d'Heather est juste ?* ».

Heather works with Roger and Susan in the group discussion in the video A private universe*. Unlike the other representations, Roger's depicts the earth's path around the sun as oval in shape. He says that the oval path explains the seasons: "When the earth is really close to the sun, it's hot. When it's far away, it's cold. If it's a circle, then the temperature is always the same, 'cause the earth is the same distance from the sun." Susan adds, "If it's oval, it'll be hot twice a year and cold twice a year!"*

Il est d'ores et déjà possible d'avancer que cette approche pose un problème de taille : en considérant que toutes les conceptions sont exprimables, elle se rend inaccessibles tous les modes de raisonnement implicites et les modèles mentaux inconscients de l'élève ; ceux qui ne nécessitent pas seulement un changement mais une déconstruction. Nous reviendrons sur ce point ultérieurement.

3.2.3.3. Créer un conflit conceptuel

Lorsque les élèves prennent conscience de leurs conceptions à travers leur présentation aux autres et par l'évaluation de celles de leurs pairs, il est supposé qu'ils deviennent insatisfaits de leurs propres idées ; le conflit conceptuel commence à se mettre en place. En reconnaissant l'inadéquation de leurs conceptions, les élèves deviennent dès lors plus enclins à les changer.

Pour créer un conflit encore plus grand, le professeur présente un « cas incompatible ». Le *cas incompatible* est un phénomène ou une situation qui ne peut être expliqué grâce aux conceptions actuelles de l'élève, mais peut l'être par le « concept » qui est le sujet de l'enseignement. Si la matière est la science, les élèves pourront suggérer une expérience. Le professeur pourra aussi exposer un *cas incompatible* en présentant des données anormales qui contredisent manifestement les conceptions actuelles de l'élève (Chinn & Brewer, 1993).

3.2.3.4. Encourager l'accommodation cognitive.

Enfin, on devra donner aux élèves du temps pour réfléchir et réconcilier les différences entre leurs conceptions et la théorie visée. Le professeur devra incorporer des activités réflexives dans ses cours pour promouvoir l'accommodation cognitive ou la restructuration des conceptions de l'élève. Cela conduit à la conception d'un *environnement coopératif d'apprentissage*, considéré par Davis comme « *nécessaire à un enseignement réussi par le changement conceptuel* » (2001). Il doit y avoir des opportunités de discussion, les étudiants doivent se sentir en sécurité pour partager leurs points de vue lorsqu'ils considèrent et évaluent d'autres perspectives (Bruning, Schraw & Ronning, 1999 ; Scott, Asoko et Driver, 1991). Le « facteur sécurité » est tout particulièrement important quand l'enseignement utilise la stratégie de conflit cognitif : selon l'étude de Dreyfus, Jungwirth & Eliovitch (1990), les élèves « les moins doués » (quelle que soit la signification de ce terme vague et un peu dangereux compte tenu de la diversité possible des origines de cet état : déficiences cognitives, conflit avec l'école ou l'autorité, problèmes personnels, maladie physiques ou psychologies…) souffriraient parfois d'une perte de confiance en eux, percevant le conflit comme un nouvel échec.

Ces stratégies s'inspirent donc des théories de Posner *et al.* en ceci que leur objectif commun est de créer les quatre conditions nécessaires au changement conceptuel : les apprenants doivent devenir insatisfaits de leurs conceptions du moment et accepter une nouvelle idée comme intelligible, plausible et féconde. L'évaluation et la clarification régulière des conceptions aident en outre les élèves à développer une conscience métaconceptuelle, en leur permettant de comprendre comment ils développent leurs propres convictions (Vosniadou, 1994).

Ces points de vue sur l'apprentissage encouragent la discussion entre élèves et professeur comme moyen de promouvoir le changement conceptuel, ce qui implique de faire évoluer le rôle des professeurs, comme l'illustre la figure 13, en les amenant à acquérir de nouvelles stratégies d'instruction, mais également à reconceptualiser leur conception de ce qu'est l'enseignement. En cela, on retrouve les idées générales développées dans les diverses théories constructivistes évoquées plus haut.

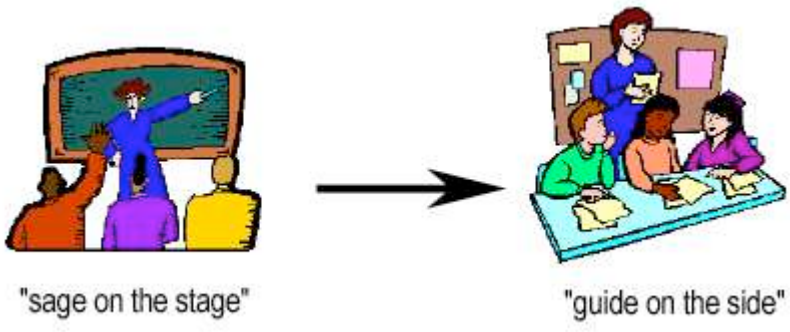


Figure 13 : *Changer les conceptions liées à l'enseignement. Plutôt que le « Sage sur la scène », le professeur devient le « Guide aux côtés de » dans l'approche constructiviste.*

Notons que la théorie du changement conceptuel est également applicable à d'autres domaines que les sciences : le site *Constructing History: How Historians See the Light*[17] illustre notamment son utilisation dans le cadre de l'enseignement de l'histoire.

3.2.4. Analyse critique de la théorie

Un certain nombre de critiques peuvent être formulées à l'encontre de l'idée de changement conceptuel. Il est toutefois difficile de tracer une frontière nette entre ce qui en constituerait le cœur et les travaux qui en ont découlé. Nombre de défauts de la théorie initiale ayant été formulés, puis corrigés par des chercheurs se revendiquant eux-mêmes de ce courant théorique, nous nous concentrerons surtout, dans cette section, sur la théorie révisée de Strike et Posner publiée en 1992.

L'analyse critique de la théorie peut porter sur divers plans. Le premier, d'ordre épistémologique et méthodologique, est lié à son ontologie et à sa scientificité. Le second, d'ordre scientifique, a trait à la précision, à la pertinence et à la cohérence de son contenu. Le troisième se réfère à la fécondité de la théorie en termes de prolongements possibles. Le dernier, d'ordre pédagogique, porte sur sa capacité à rendre compte des observations et à produire des outils pertinents pour la pratique.

3.2.4.1. Ontologie et scientificité

La principale inquiétude qu'il est possible de formuler à l'égard de cette approche est son inspiration directe de théories épistémologiques, c'est-à-dire de théories décrivant des systèmes différents. N'est-on pas en droit de se méfier de l'intuition de ses premiers auteurs lorsqu'on connaît le pouvoir séducteur de la théorie de Kuhn, pouvoir qu'ils ne renient d'ailleurs pas eux-mêmes ?

La théorie du changement conceptuel prend heureusement garde à se rendre compatible avec la théorie psychologique piagétienne, qui en constitue par conséquent une sorte de garde-fou. Il se trouve en effet que certaines similitudes existent, d'une part entre les deux systèmes concernés par le rapprochement opéré (1/ le savoir d'un apprenant et 2/ les connaissances développées par la communauté scientifique)

[17] www.coe.uga.edu/epltt/cc_example/history1.html - Dernière consultation le 05/02/2013.

et d'autre part, entre leurs comportements respectifs (1/ science normale, controverse puis révolution scientifique et 2/ assimilation, conflit cognitif et accommodation). La démarche des auteurs procède donc bien d'une analogie, et non d'une métaphore ou d'une transposition indue.

La théorie est-elle pour autant scientifique ? Au niveau de la démarche employée pour sa conception, de son pouvoir prédictif, de la reproductibilité de ses observations et de son acceptation au sein de la communauté, elle semble vérifier les critères nécessaires. Au niveau de sa falsifiabilité, les auteurs de l'article princeps prennent également la peine de la mettre immédiatement à l'épreuve, sur un exemple d'enseignement concret. La théorie est également évolutive, dans le sens où ils sont capables de s'adapter aux critiques formulées par leurs pairs en proposant une théorie révisée. Des critères qui seront plutôt moins bien vérifiés par le modèle allostérique dans sa version initiale, ce qui nous conduira à travailler notamment dans cette direction.

C'est probablement à toutes ces raisons, en plus du vide théorique existant à cette époque où les sciences cognitives balbutiaient encore, que la théorie doit son succès historique. En cette matière, l'impact sur l'opinion de l'impression de scientificité ne doit pas être négligé dans l'acceptabilité d'une théorie ; Jurdant (2000) défend à cet égard la même argumentation à l'égard de la psychanalyse de Freud[18] pour expliquer son succès en dépit de la faiblesse de ses bases théoriques.

3.2.4.2. Pertinence théorique et cohérence

- Les conceptions

L'entité fondamentale sur laquelle repose la théorie du changement conceptuel est la *conception*. Or c'est peu dire que l'article initial (Posner *et al.,* 1982) n'en donne aucune description. Au contraire, il assimile conceptions alternatives et croyances naïves, concepts et conceptions : « *In this article the terms « commitments », « concepts », and « conceptions » are equivalent. Although these terms (particularly the latter two) refer to differing levels of conceptualization, we do not distinguish among the levels in this article* ». Tout au plus le lecteur a-t-il la possibilité de comprendre à peu près de quoi il s'agit; la critique a d'ailleurs été formulée exactement de la même manière à l'encontre de la théorie de Kuhn, dont elle découle. Weinberg (1999) rapporte qu'on peut trouver plus de 20 sens différents du terme paradigmes dans *La structure des révolutions scientifiques* (1970). A ce niveau, le modèle allostérique de l'apprendre présentera une réelle supériorité sur la théorie du changement conceptuel.

La notion de *p-prims* introduite par diSessa en 1993 (voir plus loin) permettra toutefois de combler partiellement cette lacune, bien qu'elle s'applique surtout aux axiomes physiques tirés de l'expérience du monde sensible, et s'apparente davantage à la physique naïve : « *Learning physics depends not so much on the quantity or quality of science information presented to the student, but on the process (sometimes intuitive, sometimes intentional) of the novice prioritizing previously-held naive p-prims, until the p-prims are replaced with more accurate and fundamental explanations, resulting in an expert understanding of physical phenomena* ».

- La transformation des conceptions

C'est sur ce point que la théorie nous semble la plus critiquable et, à cet égard, le modèle allostérique présentera également un avantage manifeste. Pour presque tous les auteurs du changement conceptuel en effet, les conceptions sont inconscientes mais conscientisables, non exprimées mais formulables ; il suffirait de les faire dire, écrire ou dessiner par l'élève pour pouvoir les lui faire modifier. Tout n'est plus alors qu'une question de conflit cognitif, d'intelligibilité, de plausibilité et de fécondité de la nouvelle conception que l'enseignant cherche à inculquer à l'élève. En d'autres termes, on pourrait presque considérer que les méthodes pédagogiques dérivées de la théorie du changement

[18] Voir également www.mediapart.fr/club/blog/baudouin-jurdant/220510/freud-et-le-desir-de-scientificite-propos-de-l-ouvrage-de-michel-o - Dernière consultation le 05/02/2013.

conceptuel conduisent à un enseignement empiriste amélioré où, pour revenir à notre métaphore de la maison, on fait repérer par l'élève la pierre à changer avant de lui en imposer une autre.

Ce défaut de la théorie n'est pas indépendant du précédent : une description trop fruste de la structure du savoir conduit à une vision simpliste de la manière de le faire évoluer. Comme nous le verrons plus loin, les conceptions ne sauraient être considérées comme de simples idées, fussent-elles des *p-prims*. Elles constituent les soubassements de la pensée et, à cet égard, s'apparentent d'avantage à des structures cérébrales qu'à des concepts scientifiques.

- La notion de « changement »

Dès lors, on comprend également la faiblesse de l'idée de « changement ». S'agit-il simplement « d'échange », de « clarification » et de « séparation » de concepts plus fins, comme l'évoque diSessa ? En d'autres termes, change-t-on vraiment de conception comme la communauté scientifique change de paradigme ? Rappelons les questions que se posent, Posner *et al.* (1983) pour construire leur théorie :

- « *Under what conditions does one central concept com to be replaced by another?* »
- « *What are the features of a conceptual ecology which govern the selection of new concepts?* »

Il n'est question que de remplacement et de sélection de nouveaux concepts ; d'opérations dont la difficulté de mise en œuvre est corrélée à l'incommensurabilité des concepts initiaux et finaux. Certes la notion de « pièces détachées » et de *p-prims* mal utilisées nécessitant une modification des règles d'activation est intéressante, chez diSessa ; mais dans toute cette littérature, il manque une idée fondamentale qui consistera, dans le modèle allostérique, à proposer une déconstruction des conceptions (et des chemins de pensée qui y conduisent) avant de les réaménager.

- La difficulté du changement

Constatant la difficulté du changement conceptuel, les auteurs s'en remettent alors quasiment exclusivement à l'analyse de la conception future : une fois que la conception initiale a été identifiée par l'élève et perturbée par l'enseignant (deux opérations considérées comme faciles à mettre en œuvre), il suffit de rendre intelligible, plausible et féconde la conception de remplacement. Ces critères nous seront certes d'une grande utilité, mais ils placent la difficulté sur l'enseignant et non sur l'élève. Et ils ne permettent pas de comprendre réellement la résurgence de certaines conceptions, alors même que l'apprentissage semble avoir été effectué.

Posner *et al.* mentionnent bien ce problème dans la fin de leur article de 1983 : « *Our interviews also indicate that what may initially appear as an accommodation may turn out to be something less than that. […] People who accept Einstein's two postulates may understand them in a rather non-Einsteinian fashion. Often it appears that as students -- who have accepted the two postulates -- begin to realize their counterintuitive implications or their conflict with Newtonian notions of space and time, the commitment to the two postulates weakens* ». Hélas ce problème n'est envisagé qu'en termes de nécessité d'une accommodation plus large, même si les auteurs reconnaissent la non-linéarité des apprentissages et l'existence de fréquents retours en arrière.

Des nuances ont certes été apportées plus tard à cette idée initiale selon laquelle lors du changement conceptuel, une conception nouvelle chasse l'ancienne définitivement. Duit & Treagust (2003) rapportent notamment que : « *There appears to be no study which found that a particular student's conception could be completely extinguished and then replaced by the science view. Indeed, most studies show that the old ideas stay alive in particular contexts. Usually the best that could be achieved was a 'peripheral conceptual change' (Chinn & Brewer, 1993) in that parts of the initial idea merge with parts of the new idea to form some sort of hybrid idea (Gilbert et al., 1982; Jung 1993)* ». Mais faute d'expliciter cette dimension, la théorie présente le risque d'induire les enseignants en erreur, les amenant à employer une pédagogie linéaire plutôt que spirale et redondante.

3.2.4.3. Fécondité théorique

La fécondité et la diffusion de la théorie du changement conceptuel conduisit à un foisonnement de descriptions complémentaires qu'il serait difficile de décrire intégralement. De ce point de vue, elle ne peut être contournée et on peut s'étonner qu'elle soit si peu enseignée dans les études d'accès à l'enseignement et, d'une manière générale, connue des enseignants francophones européens.

Dans un article récent, Özdemir & Clark (2007) proposent une distinction qui permet de séparer en deux groupes différents les recherches sur le changement conceptuel, facilitant la compréhension de l'ensemble de ces prolongements. Ces groupes partageraient, selon les auteurs, des perspectives théoriques contraires en matière de structure du savoir d'un individu ; pour les uns, ce savoir serait vu comme un ensemble de *théories*, pour les autres comme un ensemble d'*éléments* : « *Is a student's knowledge most accurately represented as a coherent unified framework of theory-like character (e.g., Carey, 1999; Chi, 2005; Ioannides & Vosniadou, 2002; Wellman & Gelman, 1992)? Or is a student's knowledge more aptly considered as an ecology of quasi-independent elements (e.g., Clark, 2006; diSessa, Gillespie, & Esterly, 2004; Harrison, Grayson, & Treagust, 1999; Linn, Eylon, & Davis, 2004)?* ».

Pour notre part, nous croyons reconnaître dans cette querelle un exemple typique de polarisation artificielle d'une communauté autour de deux conceptions de pertinences équivalentes, et préférons considérer que le savoir peut être vu comme étant constitué d'éléments épars, dont certains sont organisés en théories. Mais toujours est-il qu'au sein de ces deux courants, le nombre et la nature des thématiques des recherches effectuées donnent une bonne indication de la fécondité de la théorie de Posner et Strike. On trouve par exemple, chez les tenants de la *knowledge-as-theory perspective*, des travaux portant sur :

- L'incommensurabilité des conceptions des adultes et des enfants (Carey, 1985) ;
- La transformation des théories naïves (Carey, 1999) ;
- L'évolution des modèles mentaux et des *framework theories*[19] (Ioannides & Vosnadiou, 2002 ; Vosnadiou & Brewer, 1992, 1994) ;
- Les changements ontologiques (Chi, 1992 ; Vosnadiou & Ioannides, 1998).

Du côté des partisans de la *knowledge-as-elements perspective*, par ailleurs, une idée fructueuse introduite par diSessa nous semble intéressante à mentionner, notamment parce que nous la réutiliserons plus tard : diSessa choisit en effet d'appeller *p-prims* les structures de base de la connaissance chez un individu (diSessa, 1993). S'inspirant des « phénomènes primordiaux » (*Urphänomen*) de Goethe, idées abstraites mais issues de l'expérience phénoménologique du monde, il propose de parler de « primitives phénoménologiques » pour décrire les axiomes (souvent inconscients) construits à partir de notre vie de tous les jours : « *On our experience of everyday physical phenomena, we all have collections of common-sense, intuitive ideas that seek to explain the phenomena. These naive concepts or general principles are called "phenomenogical primitives" or p-prims, and usually operate below the level of consciousness* ».

Ces *p-prims* s'activent spécifiquement dans une situation donnée. Pour diSessa, l'apprentissage apparaît alors comme la construction 1/ de nouvelles *p-prims* ou 2/ de règles d'activation des *p-prims* : « *For the novice student, the process of learning consists in "cutting apart" some p-prims into ideas that more accurately reflect reality, and in abandoning others that are false or no longer useful. This results in a re-ordering of the priority of these p-prims so that they do not constitute a barrier to an expert understanding of physics concepts* ». Une description qui nous sera particulièrement utile lors de l'explicitation des conceptions du modèle allostérique.

Lors de la reformulation de ce dernier, nous reviendrons à la fois sur les enseignements de la théorie du changement conceptuel et sur les extensions qui en ont été proposées, certaines relevant d'ailleurs

[19] Les framework theories sont les ensembles de présupposés épistémologiques et ontologiques qui contraignent l'acquisition des connaissances de l'apprenant.

plus de courants nouveaux au sein d'un changement conceptuel érigé en paradigme, que de véritables approfondissements de la théorie.

3.2.4.4. Ampleur descriptive et pertinence pédagogique

Par rapport aux pédagogies empiristes et behavioriste, l'approche liée au changement conceptuel présente à la fois les avantages des pédagogies constructivistes traditionnelles et ceux que lui confère sa dimension théorique. A cet égard, elle est susceptible de couvrir des situations pédagogiques très diverses, comme en atteste d'ailleurs son succès auprès des enseignants anglo-saxons et comme nous l'avons relaté plus haut. Toutefois, en n'insistant pas suffisamment sur les obstacles à l'apprentissage, elle se coupe d'une grande diversité de leviers et d'outils pourtant indispensables dans les cas où une conception (ou un groupe de conceptions) robuste doit être supprimé ou transformé, qu'il s'agisse de conceptions liées à un savoir ou constituant des règles d'activation du savoir ; une difficulté pourtant partiellement pointée par Özdemir & Clark (2007) lorsqu'ils écrivent : « *Because of this web-based relationship between concepts, a revision to a concept requires revisions to the others* ».

Par ailleurs, dans ce modèle, l'apprentissage est souvent exprimé en termes de comparaison entre l'intelligibilité, la plausibilité et la fécondité des conceptions rivales (Duit & Treagust, 2003) ; c'est oublier l'importance du contexte social et affectif, dont nous étudierons les effets en introduisant une notion unique destinée à caractériser la stabilité d'une conception. Car si l'enseignant oublie l'impact des simples opinions des proches et camarades de l'élève, se contentant de lui présenter des conceptions scientifiquement intelligibles, plausibles et fécondes, il s'expose à de grandes désillusions.

Dans la mesure où les anciennes conceptions sont rarement totalement effacées, c'est également le contexte dans lequel se trouve l'apprenant qui le conduira à exprimer l'une ou l'autre, après mûre réflexion ou par un mécanisme réflexe. La théorie ne permet donc pas de comprendre la notion de chemins de pensée, pas plus que la question de leur inhibition, *a fortiori*. Des limites dont certaines devront aussi être dépassées dans le modèle allostérique, ce à quoi nous nous emploierons plus loin.

En revanche, elle insiste assez vite sur la dimension métacognitive de l'apprentissage, Posner *et al.* mentionnant très tôt l'importance de la perception de la science par l'apprenant et parlant à cet égard d'*epistemological commitments*. Ce que Duit & Treagust relèvent d'ailleurs en s'étonnant du fait que de nombreuses études sur l'apprentissage des sciences ne portent toujours que sur les contenus scientifiques et non pas le méta-niveau de l'appréhension de la nature de la science elle-même : « *There are still a remarkable number of studies on students' learning in science that primarily investigate such students' conceptions at the content level. Since the middle of the 1980s investigations of students' conceptions at meta-levels, namely conceptions of the nature of science and views of learning (i.e., meta-cognitive conceptions) also have been given considerable attention*. ».

Grâce aux révisions apportées par l'article de 1992, la théorie du changement conceptuel ne néglige pas non plus les dimensions infracognitive et émotionnelle, comme nous l'avons vu plus haut. La notion d'intentionnalité dans l'apprentissage elle-même est particulièrement bien développée dès les années 90 par Bereiter & Scardamalia (1989). Salomon & Globerson (1987) définiront notamment la notion de changement conceptuel intentionnel comme : « *a construct which reflects a voluntary state of mind, and connects among motivation, cognition and learning* ». Il manque toutefois une formalisation qui permette d'appréhender ces notions avec plus de précision.

On notera enfin les constats de Duit & Treagust, (1998) qui nous confortent dans notre propre entreprise, selon lesquels :

1. il est nécessaire de dépasser la vision constructiviste de l'apprentissage et de l'intégrer à des cadres théoriques plus larges « *in order to adequately adresse the complex process of* learning »,
2. très peu de connexions sont réalisées entre les travaux sur le changement conceptuel et la psychologie cognitive, à part dans l'ouvrage de Sinatra & Pintrich (2003).

3.2.5. Difficultés inhérentes au changement conceptuel

Si les approches par le changement conceptuel se sont avérées être, depuis les années 80, plus performantes que nombre de pédagogies fondées sur d'autres modèles d'apprentissage, elles comportent un certain nombre de limites intrinsèques, dont certaines ont été déjà évoquées et que nous reprenons ici de manière plus générale.

La première limitation des recherches dans ce domaine porte sur la nature des savoirs étudiés (Fensham, 2001), essentiellement envisagés comme des connaissances notionnelles isolées plutôt que comme des éléments intimement liés à des processus d'abstraction, de conceptualisation et de formalisation, dont l'utilisation est régie par des processus décisionnels omniprésents, eux-mêmes guidés par des appréciations sociales, affectives et émotionnelles. Cette focalisation sur la dimension rationnelle de l'apprentissage, contestée depuis l'origine dans la théorie du changement conceptuel, reste critiquables en ne portant pas suffisamment d'attention aux processus émotionnels et intentionnels (Sinatra & Pintrich 2003).

Une deuxième limitation porte sur la trop faible considération portée à la dimension sociale de l'apprentissage (Matthews, 1993), notamment par rapport à la dimension épistémologique (Duit & Treagust, 1998). D'autres critiques, telles que celles de Vosnadiou & Ioannides (1998) considèrent que la théorie du changement conceptuel porte trop d'attention au conflit cognitif, y recherchant notamment trop souvent un *insight* qui s'avère plus qu'hypothétique (Limon, 2001) et sous-estimant la difficulté du « changement » à opérer. Selon eux, l'apprentissage des sciences devrait plutôt être considéré comme un « *gradual process during which initial conceptual structures based on children's interpretations of everyday experience are continuously enriched and restructured* ». Ils ajoutent qu'un modèle d'apprentissage performant devra tenir compte et encourager une « conscience méta-conceptuelle » permettant à l'apprenant de contrôler ses propres changements conceptuels d'une part, et les facteurs socio-culturels facilitateurs ou inhibiteurs de ces changements.

L'importance de la métacognition, qui rassemble à la fois la vision de l'élève sur la discipline qu'il apprend et sur son propre apprentissage, semble toutefois être de plus en plus reconnue, même à l'école primaire. Le modèle d'apprentissage de Georghiades (2000) rassemble notamment trois dimensions complémentaires : le changement conceptuel fournit la base épistémologique du processus, les notions d'acquisition et de durabilité des conceptions constituent le principal problème à résoudre, la métacognition en est le médiateur.

L'ensemble de ces difficultés ont été abordées par Giordan, dont le modèle allostérique tient compte autant que possible. En particulier, à l'inverse de la théorie du changement conceptuel, la reconnaissance de la nécessité de « déconstruire » certaines conceptions préliminaires implique dans ce modèle une prise en compte plus importante de la difficulté inhérente au changement et des risques de retour en arrière. Elle pousse dès lors à tenter d'en reconnaître les mécanismes. C'est ce qui nous amène dès à présent à sa description complète.

3.3. Le modèle allostérique de l'apprendre

Pour constituer le cœur de notre approche théorique, le modèle allostérique de l'apprendre, développé au LDES depuis plus de vingt-cinq années (Giordan & De Vecchi, 1987 ; Giordan & Girault, 1996 ; Eastes & Pellaud, 2005), satisfait à toutes les conditions nécessaires à notre projet de formalisation didactique des processus d'apprentissage : fort ancrage dans la pratique pédagogique, bases épistémologiques solides, haut degré de conceptualisation, nombreuses possibilités de formalisation, multiples connexions avec les autres théories, grande adaptabilité interdisciplinaire… En outre, le choix de ce modèle est très largement légitimé par le nombre de validations et de prolongements théoriques et pédagogiques dont il a fait l'objet ces dernières années (Pellaud, 2000, 2002 ; Honorez *et al.*, 2001 ; Cariou, 2007 ; Pellaud *et al.*, 2007 ; Bourdeault, 2010 ; Golay *et al.*, 2007, 2009 ; Bêty, 2010). La description que nous en faisons ci-dessous explicite ce choix, en terminant par l'évocation de ses avantages théoriques et pratiques.

3.3.1. Historique

A l'origine de la dénomination du modèle, une métaphore émise par André Giordan (Giordan, 1986 ; Giordan, 1989) : le savoir, modulaire et siège de processus dynamiques permanents, lui rappelle les protéines allostériques qu'il a rencontrées dans sa formation de biologiste. Plastiques et sensibles à leur environnement, elles adoptent des formes et des fonctions différentes selon le milieu dans lequel elles sont placées. Ce concept a été formalisé par Monod, Changeux et Wyman dans une série d'articles, dont le plus important a été publié en 1965 dans *Journal of Molecular Biology* (Monod *et al.*, 1965).

***ALLOSTERIE** (Wikipédia, 2011)*

« *L'allostérie (du grec ἄλλος, allos : autre et στερεός, stereós : solide) est un mode de régulation de l'activité d'une enzyme par lequel la fixation d'une molécule effectrice en un site modifie les conditions de fixation d'une autre molécule, en un autre site distant, de la protéine. […] L'hémoglobine constitue un exemple important de protéine allostérique, bien qu'elle ne soit pas une enzyme stricto sensu mais plutôt une molécule de transport. Chaque monomère de l'hémoglobine, qui en comporte quatre, peut fixer une molécule de dioxygène. La fixation de la première molécule de dioxygène augmente l'affinité de liaison de la seconde, la fixation de la seconde augmente l'affinité pour la troisième et ainsi de suite (coopération positive par effet homotrope).* »

Il ne faut pas plus que cette métaphore pour que les anglo-saxons regroupent l'ensemble de ses travaux sous le vocable de « allosteric learning model ». Contrairement à beaucoup d'autres modèles, ce dernier possède la particularité principale de récuser l'hypothèse de linéarité de l'acquisition des savoirs, en proposant qu'ils se fassent et se défassent au gré des expériences vécues par l'individu, mais également sous l'influence forte de ses affects et de ses émotions. C'est ainsi qu'apparaît le concept de « conception » (Giordan, 1978 ; Giordan & De Vecchi, 1987), véritable brique élémentaire de la pensée, et que l'apprendre est défini non plus comme une simple dynamique de construction du savoir, mais comme un « processus de déconstruction-reconstruction des conceptions » (Giordan & Girault, 1996). Il induit alors une vision systémique qui étend les aspects cognitifs aux paramètres émotionnels, affectifs, motivationnels, méta- et infracognitifs et qui prend en compte les aspects paradoxaux de l'apprendre (Giordan, 2007 ; Golay *et al.*, 2010).

En portant une attention accrue au contexte dans lequel se déroule l'apprentissage, le modèle allostérique commence alors à fournir aux enseignants, par les nouveaux éclairages sur l'élaboration des savoirs individuels qu'il propose, des clés précieuses pour mieux comprendre leurs élèves et la façon dont ils perçoivent leurs enseignants, en leur proposant notamment un environnement didactique destiné à faciliter l'apprendre (Giordan & Girault, 1992 ; Giordan & Pellaud, 2004).

De par ces multiples potentialités et depuis sa première formulation, le modèle allostérique de l'apprendre n'a cessé de se développer, selon de multiples axes (Education au développement durable : Pellaud, 2000 ; Pellaud, Giordan & Eastes, 2007 ; Giordan & Souchon, 2008 ; Education thérapeutique : Golay, Lagger & Giordan, 2007, 2009).

3.3.2. La conception, structure élémentaire du savoir

- <u>Définition</u>

A partir de leur introduction dans sa thèse en 1976 (Giordan, 1978), la nature des « conceptions » (Giordan, 1978), pierres angulaires du modèle, et leurs implications ont été continuellement précisées par Giordan. Une dizaine d'années plus tard, on pouvait notamment lire : « *La conception n'est pas le produit de la pensée, elle est le processus même de l'activité mentale. Elle devient une stratégie, à la fois comportementale et mentale, que gère l'apprenant pour réguler son environnement* » (Giordan, 1996b). Cette réflexion sur la nature des conceptions a conduit à des représentations toujours plus complexes,

destinées à rendre compte de toutes les caractéristiques utiles à la compréhension de ces éléments fondamentaux de la pensée. En 2003, la plus complète mêlait la métaphore de l'iceberg (Giordan & De Vecchi, 1987) à la description articulée de leurs soubassements, comme le rappelle la figure 14 (Giordan & Pellaud, 2004). Une représentation qui constituera le point de départ de notre formalisation du modèle allostérique.

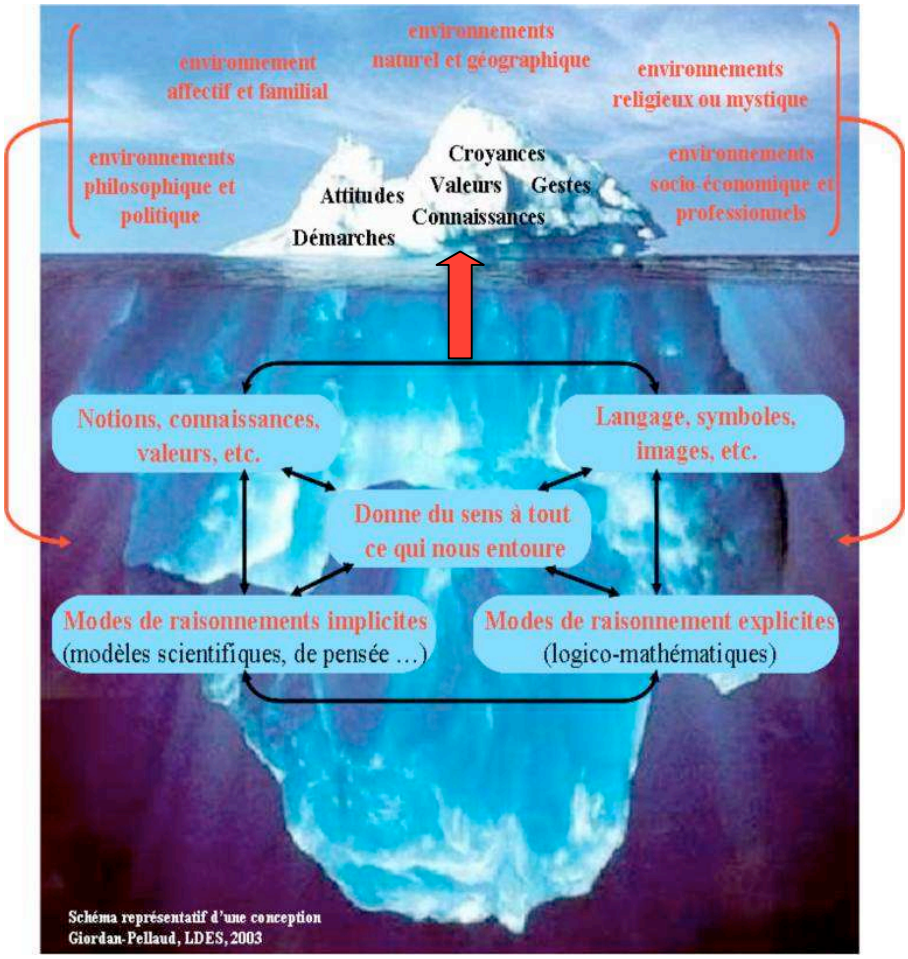


Figure 14 : La métaphore de l'iceberg pour représenter les conceptions (2003, publié en 2004).

L'encadré qui suit reprend les termes par lesquels nous faisions le point sur cette notion deux années plus tard (Eastes & Pellaud, 2005).

Pourquoi est-il si difficile d'apprendre certaines choses et pourquoi certains apprentissages sont-ils réversibles ? Pourquoi au contraire suffit-il d'entendre une seule fois un mot ou une explication pour les conserver à jamais ? Tout cela dépend avant tout de nos « conceptions ». Ces dernières à la fois constituent les briques élémentaires du savoir et construisent les fondements de la pensée, c'est-à-dire l'ensemble des mécanismes qui nous permettent de produire du sens pour mieux appréhender notre environnement et agir sur lui.

Bien plus que de simples représentations ou images mentales, elles font donc appel à des modes de raisonnement, à des réseaux de références et des signifiants variés. L'ensemble de ces éléments est directement issu du vécu de chacun, influencé par les multiples environnements dans lesquels nous baignons quotidiennement et dont les aspects affectifs vont souvent jouer un rôle déterminant (figure [14]).

Ces conceptions ne sont jamais évidentes et rarement exprimées de manière explicite. Tel l'iceberg repéré par la petite fraction qui affleure au-dessus de l'eau, elles ne sont révélées que par des gestes, des attitudes, l'expression de valeurs, de croyances ou de connaissances, qui peuvent apparaître de manière tout à fait anodine au cours d'une discussion, d'une réponse à une question, d'un dessin.

Ces informations – qui proviennent de nos environnements non seulement culturels et historiques propres, mais également géographiques, religieux, socio-économiques, politiques et surtout affectifs – influencent nos modes de raisonnements explicites (connaissances logicomathématiques) ou implicites (paradigmes sociaux, modèles, etc.), nos signifiants (linguistiques, iconiques, symboliques, etc.) et notre réseau de références (notions, concepts, valeurs, etc.), définissant ainsi un réseau sémantique, base de toute production de sens. Les conceptions, résultat de l'ensemble de ces interactions, sont donc à la fois savoir en place et filtre pour les informations nouvelles.

Dans la vie de tous les jours, dans nos relations interindividuelles, nous avons habituellement accès à cette partie émergée, ainsi qu'à quelques éléments des multiples environnements de nos interlocuteurs. Mais si cette connaissance est généralement suffisante pour gérer nos relations sociales, elle devient très vite limitée pour le médiateur qui doit intervenir directement sur l'acte d'apprendre. Pourquoi ? Parce que les conceptions de ses élèves sont à la base même de leur manière de penser, de comprendre et donc d'apprendre. Les conceptions permettent donc l'identification de situations et l'activation de savoirs acquis lors d'expériences antérieures. En ce sens, elles sont un outil indispensable à toute nouvelle acquisition de savoir.

En conséquence, parce que leurs conceptions sont influencées par leurs environnements respectifs, les élèves d'une même classe ne percevront pas tous de la même façon les propos de leurs professeurs. Lorsqu'il sera question d'énergie par exemple, nul doute que ce terme évoquera des choses très différentes chez le fils du physicien nucléaire, la fille d'un agriculteur biodynamicien, d'un installateur de cellules photovoltaïques ou d'un prince du pétrole, le fils d'un professeur de yoga ou d'un animateur d'une célèbre station de radio française.

- Exemples

Sur ces bases, il est possible d'interpréter, voir de prévoir, beaucoup d'observations en classe. C'est ainsi que nous rencontrâmes personnellement dans des copies d'élèves un schéma de montage expérimental représentant un ballon de baudruche rempli d'acide sulfurique et placé au-dessus de la flamme d'un bec Bunzen, alors que le protocole parlait simplement de « ballon » (de chimiste) ; ou que nous rencontrions l'incompréhension d'une élève de lycée incapable de concevoir comment on pouvait « bombarder » un atome avec des neutrons, trop attachée à sa conception du bombardier. Nous relevions encore, en réponse à la question « *Que signifie "L'atome a une structure lacunaire ?"* », cette phrase très symptomatique du blocage que peut entraîner le recours à l'abstraction des sciences physiques : « *L'atome est vide à l'intérieur ; il est rempli d'oxygène* »[20]. Considérons par suite l'image de la figure 15, certes humoristique mais analogue à ces cas que n'importe quel enseignant est amené à rencontrer dans sa carrière.

Il y est suggéré qu'un discours frontal clair et structuré est parfois incapable de modifier une pré-conception, amont au sujet traité par l'enseignant et sur laquelle l'élève s'appuie pour interpréter le discours qui lui est proposé : « *Les poissons ont besoin d'eau pour respirer* ».

- Diversité des conceptions

Une question préoccupante et souvent posée consiste à se demander si tous les élèves interprètent leur discours avec chacun leur propre conception. Le cas échéant, le travail de l'enseignant serait titanesque. Or plusieurs études montrent que le nombre de conceptions sur un sujet donné est

[20] Notes personnelles, 1982.

souvent restreint. Dans notre recherche expérimentale sur l'expérience contre-intuitive par exemple (Eastes & Pellaud, 2004b), nous obtenions invariablement deux réponses à la question « *De la boule de laine et de la boule d'aluminium disposées devant toi, laquelle a la température la plus élevée ?* » :

1. *La laine, parce qu'on porte des pulls en laine en hiver.*
2. *L'aluminium, parce qu'on couvre les grands brûlés avec des couvertures de survie en aluminium pour les protéger du froid.*

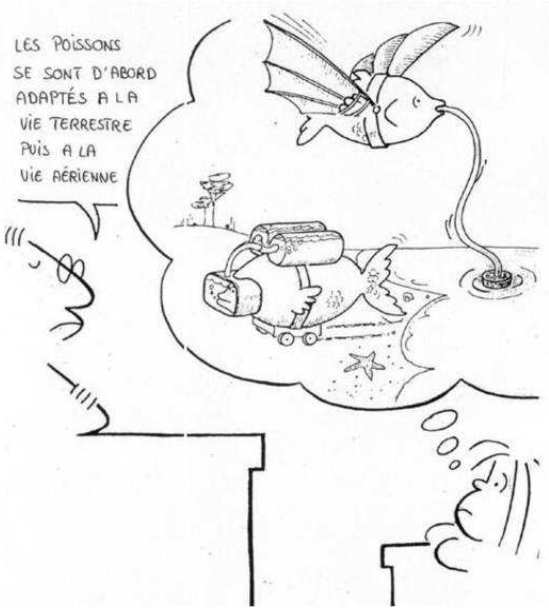


Figure 15 : Illustration humoristique du décalage entre les contenus d'un enseignement frontal et les images mentales susceptibles d'être produites par une conception tenace.

Dans une recherche menée au LDES sur les conceptions relatives à la digestion[21], par ailleurs, à l'instruction « *En te servant d'un dessin, essaie d'expliquer où vont et que deviennent un pomme et un jus d'orange quand ils sont entrés dans ton corps* », trois conceptions différentes, représentées sur la figure 16, revenaient systématiquement :

1. *Les aliments s'arrêtent à l'estomac, la digestion étant réduite à sa seule activité.*
2. *La digestion correspond à un simple trajet à travers les organes, via un tuyau qui amène les aliments vers la sortie.*
3. *Le tuyau se sépare en deux : l'un pour les liquides qui deviendront urine, l'autre pour les solides qui deviendront excréments.*

Ces conceptions ne se limitent pas aux enfants, comme le prouvent les schémas de la figure 17.

Au nombre des conceptions, et pour finir sur un exemple particulièrement parlant issu d'une autre discipline, mentionnons encore le *faux amis* en langue qui, de par la similitude des sons entraîne une erreur de sens. Ainsi la phrase « *I will eventually tell you the truth; but actually, you already know it* » ne se traduit pas par « *Je te dirai éventuellement la vérité ; mais à l'heure qu'il est, tu la connais déjà* » mais par « *Je finirai par te dire la vérité ; mais en fait, tu la connais déjà* ».

21 Enquête relatée par Giordan & de Vecchi (1987) et réalisée sur plusieurs centaines d'élèves de niveaux divers, ainsi que sur des adultes ayant suivi des cursus scientifiques et de futurs enseignants.

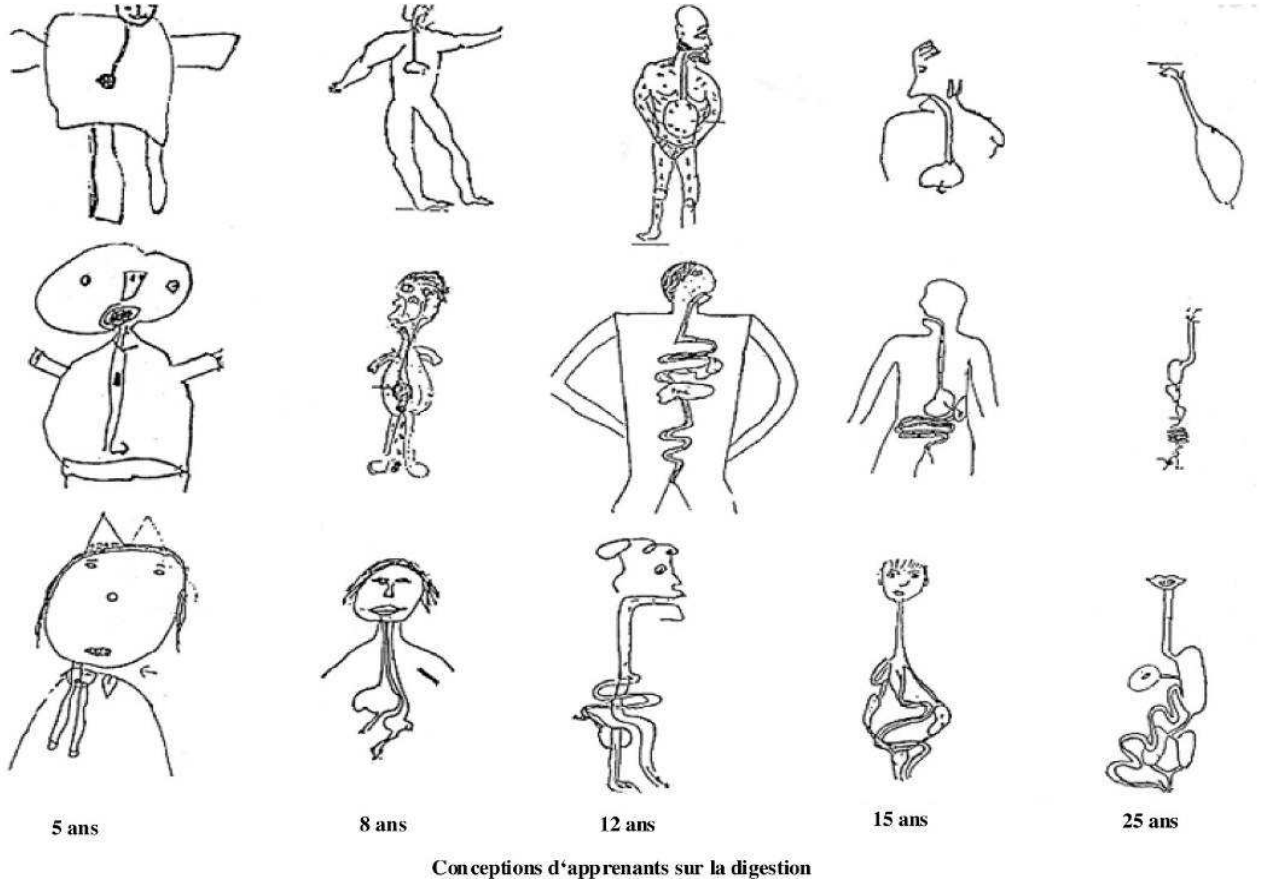


Figure 16 : Différentes conceptions de la digestion chez les enfants et jeunes adultes.

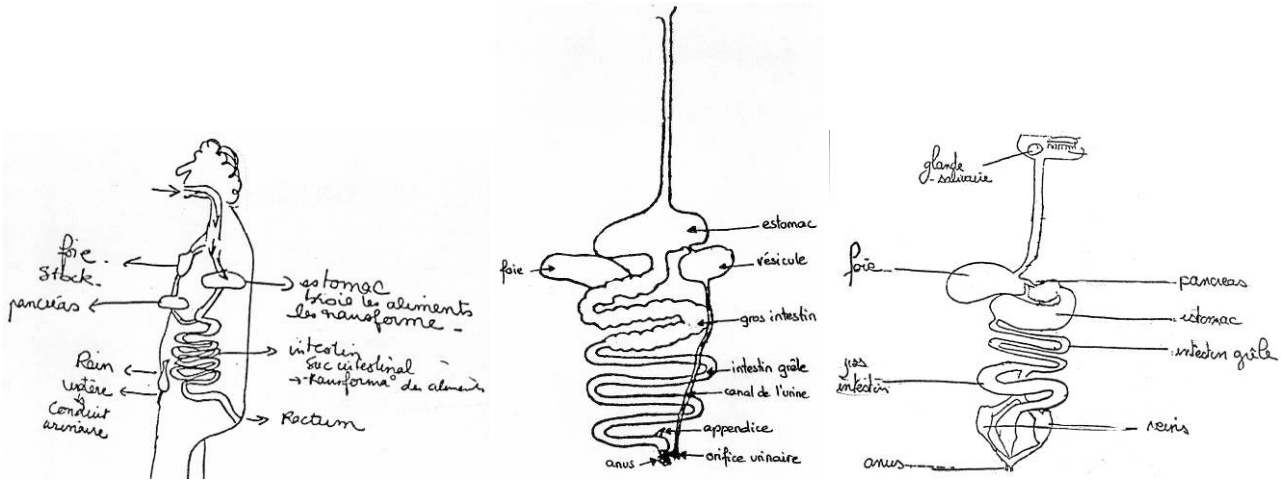


Figure 17 : Différentes conceptions de la digestion chez les adultes.

- <u>Conséquences</u>

Il en résulte une première question d'ordre pédagogique : comment se fait-il que les conceptions initiales des enfants résistent à des années d'enseignement d'un sujet pourtant classique ? Force est de constater leur stabilité, dont l'interprétation est un des points fondamentaux sur lesquels nous reviendrons et que Giordan représente humoristiquement à l'aide des images de la figure 18. La seconde question, sur laquelle nous reviendrons également, porte sur les mécanismes et moyens de leur transformation.

Figure 18 : Représentation humoristique de la résistance des conceptions à un enseignement trop frontal.

La troisième question, enfin, porte sur l'impact de nos conceptions sur notre vision du monde. Nous avons évoqué plus haut le rôle qu'avait pu avoir une vision occidentale du monde (au sens propre) sur la perception du risque de bombardement lors de la Guerre froide, et les choix erronés auxquels il avait pu conduire en matière de construction des abris atomiques suisses. Il en va de même des conceptions sur la digestion, qui peuvent avoir des répercussions plus lointaines que prévues. En effet, considérer que les « liquides » subissent un traitement similaire aux solides, dont on sait depuis l'enfances qu'ils sont « sales » peut conduire à penser que l'urine est aussi « sale » que les excréments ; c'est d'ailleurs ce que répètent invariablement les parents à leurs enfants, oubliant qu'en tant que filtrat sanguin, l'urine est stérile. Les conséquences comportementales portent alors aussi bien sur la fréquence de lavage des mains des enfants que sur les pratiques sexuelles des adultes.

3.3.3. Le cœur du modèle allostérique : la transformation des conceptions

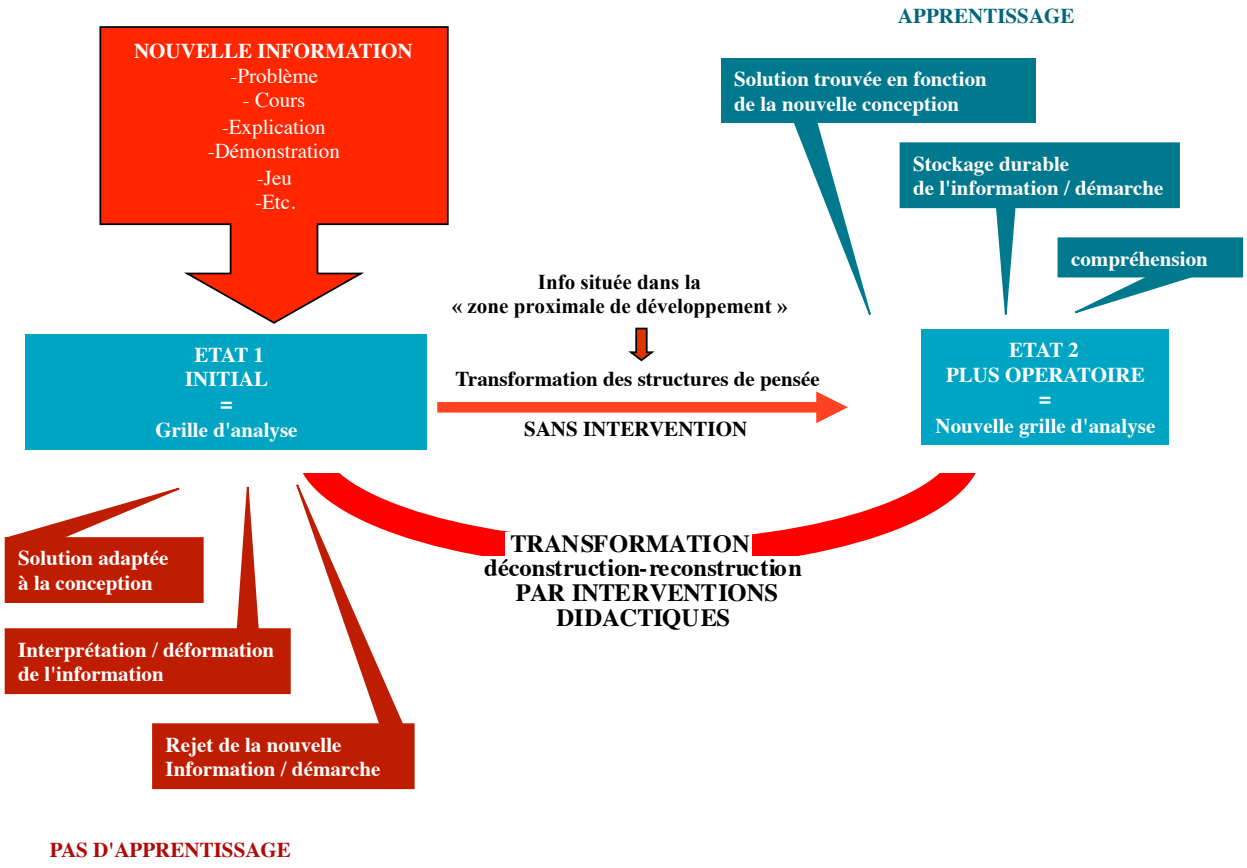


Figure 19 : Description du processus de transformation des conceptions (2002).

Notre contribution étant essentiellement théorique, nous proposons de faire débuter la description de notre apport au moment où la description du modèle allostérique commença à clairement se distinguer de celle de l'environnement didactique associé, à savoir en 2002, lorsqu'il fut publié sous la forme représentée à la figure 19 en tant que *description des processus de transformation des conceptions* (Pellaud & Giordan, 2002). Nous la décrivions dans la publication de 2005 citée plus haut au sujet des conceptions, dans les termes reproduits dans l'encadré qui suit (Eastes & Pellaud, 2005).

Considérant qu'apprendre, c'est modifier la structure de son savoir ou passer d'un « état de savoir » à un autre, généralement sous l'influence d'un ensemble d'informations nouvelles, on conçoit naturellement la formule employée par Giordan en 1998 : « *Apprendre, c'est transformer ses conceptions* ». Car au sein de la multiplicité d'environnements dans lesquels baigne l'apprenant et face aux informations qu'il reçoit, son savoir nouveau ne peut simplement s'*accumuler* qu'extrêmement rarement, comme le suppose l'idée constructiviste. En effet, si les conceptions sont indispensables pour permettre de créer le lien entre le savoir déjà acquis et le savoir à acquérir, elles peuvent vite constituer un obstacle à l'apprendre, comme Bachelard le précisait en 1938 déjà :

(…) C'est en termes d'obstacles qu'il faut poser le problème de la connaissance scientifique. Et il ne s'agit pas de considérer des obstacles externes, comme la complexité et la fugacité des phénomènes, ni d'incriminer la faiblesse des sens et de l'esprit humain : c'est dans l'acte même de connaître, intimement, qu'apparaissent, par une sorte de nécessité fonctionnelle, des lenteurs et des troubles. (…). En fait, on connaît contre une connaissance antérieure, en détruisant des connaissances mal faites, en surmontant ce qui, dans l'esprit même, fait obstacle à la spiritualisation. (…) Il est alors impossible de faire d'un seul coup table rase des connaissances usuelles. (…) Quand il se présente à la culture scientifique, l'esprit n'est jamais jeune. Il est même très vieux, car il a l'âge de ses préjugés.

Perçue à travers la grille d'analyse que constitue le système explicatif existant de l'apprenant, chaque nouvelle information va donc être interprétée, déformée, modelée et reformulée, voire appauvrie avant de pouvoir s'y adapter, le réseau de conceptions exerçant un rôle de « filtre réducteur ». Bien des exemples vont dans ce sens, montrant que, si *accommodation* il y a, elle ne se fait pas forcément dans le sens d'une meilleure compréhension des phénomènes.

Mais si les conceptions jouent un rôle de « filtre » pour toute nouvelle information et si apprendre consiste en la transformation des conceptions, nous devons pourtant accepter qu'elles soient en même temps les seuls éléments à la disposition de l'individu apprenant pour effectuer cette transformation. Il ne lui est possible d'apprendre qu'à partir d'elles ; entre temps, le savoir antérieur, seul outil à sa disposition, lui a servi de cadre interprétatif.

La figure [19] propose une première modélisation de l'apprendre ; elle montre que l'information nouvelle peut soit être filtrée et déformée par la conception, soit induire sa transformation en une conception plus opératoire.

Si l'adaptation de la nouvelle information proposée à l'apprenant n'est pas possible, alors elle peut être purement et simplement rejetée. Pour qu'elle ait quelque chance de passer « directement » (sans intervention didactique), il faut en effet qu'elle entre en résonance avec l'ensemble des connaissances antérieures de l'apprenant. Pour Vygotsky (1933), cela signifie qu'elle doit se trouver dans sa « zone proximale de développement », ce qui ne peut se produire que pour un pourcentage très restreint d'élèves. Pour tous les autres, il est nécessaire de mettre en place des interventions didactiques appropriées (en d'autres mots, un « enseignement »), tenant compte des conceptions et permettant de s'approcher au maximum de cette zone proximale de développement.

La figure [19] nous permet ainsi de mieux comprendre que l'élaboration individuelle des savoirs est faite de multiples « pas en avant », mais également « en arrière » ou « de côté », nécessitant alors des phases de « déconstruction de savoirs ».

Il est donc nécessaire de penser la transformation du savoir comme un processus simultané de « déconstruction – reconstruction » des conceptions, où l'ancien savoir serait transformé et ne cèderait véritablement la place au nouveau que lorsqu'il apparaîtrait périmé. Dès lors, il importe de chercher à savoir quels peuvent être les paramètres susceptibles de permettre cette déconstruction – reconstruction du réseau de conceptions.

En 2002, trois éléments fondamentaux constituent d'une certaine manière la signature « allostérique » de ce modèle de l'apprendre :

- La transformation du savoir s'opère par une succession d'étapes élémentaires permettant chacune de « passer d'une conception à une autre »[22].
- Dans une situation pédagogique donnée, l'information apportée à l'apprenant n'est que rarement suffisante pour induire cette transformation ; au contraire, c'est elle en général qui est transformée par la conception à modifier.
- Pour favoriser la modification de cette dernière, des interventions didactiques sont nécessaires, qui conduisent à la nécessité de construire un environnement didactique approprié et spécifique.

3.3.4. L'environnement didactique de 2002

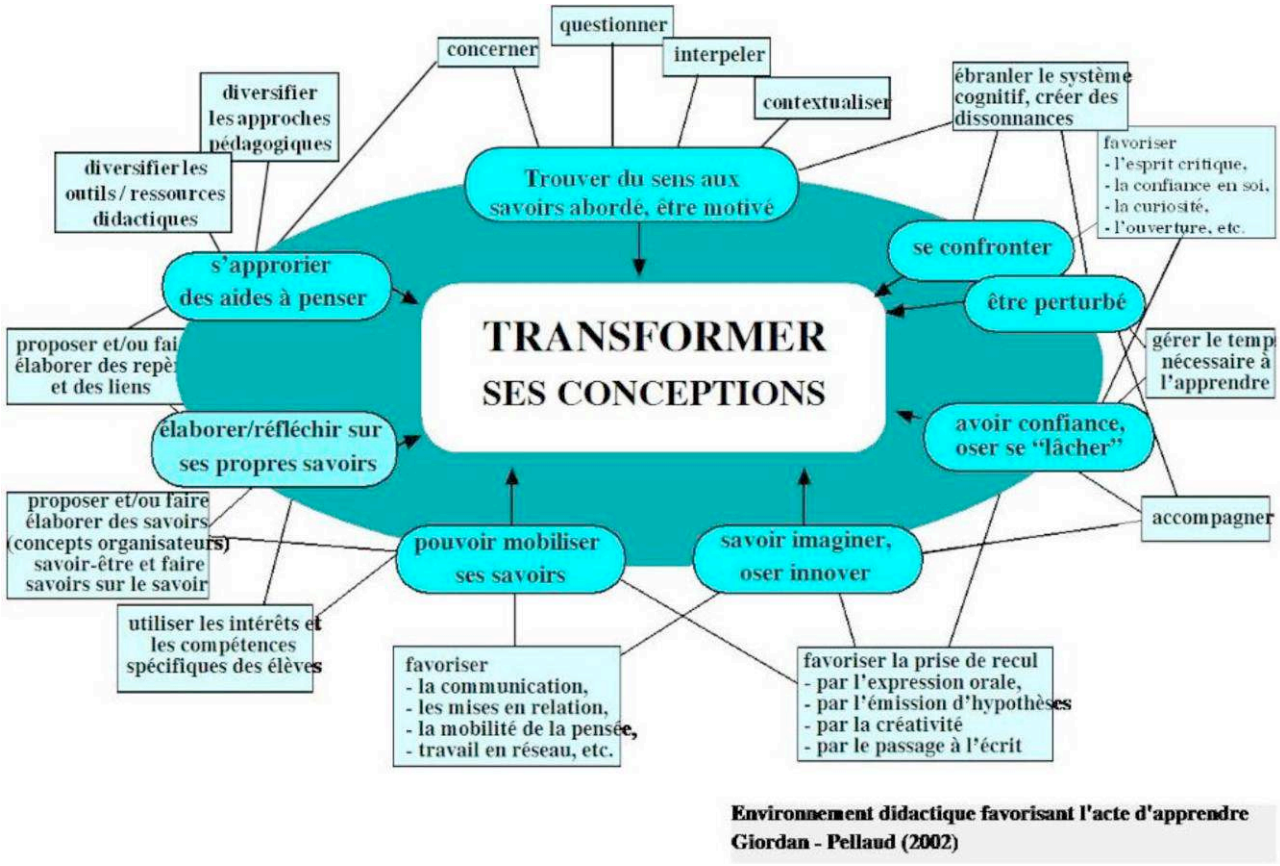


Figure 20 : Environnement didactique accompagnant le modèle allostérique (2002, publié en 2003).

Dès l'origine, un « environnement didactique » accompagne le modèle, sorte de feuille de route présentée notamment sous la forme d'une carte conceptuelle récapitulant les différents leviers sur

[22] Une expression que nous remettrons en question dans notre travail, en montrant que l'ensemble des processus liés à l'apprendre dépassent le simple « passage d'une conception à une autre ».

lesquels il est possible (et nécessaire) d'agir pour transformer les conceptions des apprenants. Il est pensé comme l'ensemble des éléments et des méthodes que l'enseignant doit mettre à la disposition de l'apprenant pour tenter de favoriser la transformation de ses conceptions. L'utilisation du verbe « tenter » est ici importante car, comme le précisent Giordan (1987) et Meirieu (2001) : « *Seul l'élève peut apprendre, et personne ne peut le faire à sa place* ». Par contre, tous deux indiquent également que : « *Si seul l'élève apprend, il ne peut apprendre seul* ». Et c'est là qu'intervient le rôle indispensable de l'enseignant ou du médiateur dans un sens large.

Pour Pellaud (Eastes & Pellaud, 2003), « *Les paramètres présentés dans la figure [20] en tant que facteurs favorables à l'acte d'apprendre ne sont efficaces que mis en interactions les uns avec les autres, car c'est dans la diversité que l'apprenant a le plus de chances de construire son propre savoir. C'est pourquoi ils sont présentés, non pas dans une forme linéaire, mais sous celle d'un « conceptogramme », un outil fort utile pour développer la pensée systémique et l'approche globale et complexe que nécessite l'approche des problèmes actuels* ».

Parmi ces paramètres, huit font référence à ce que l'élève doit avoir la possibilité de faire, d'être, de réaliser ou de penser. Ils sont présentés sur la première couronne. Les autres items, répartis tout autour de la première série, font référence au rôle de l'enseignant-médiateur et à ses apports spécifiques, en lien avec ses objectifs pédagogiques et didactiques.

Dans la publication évoquée plus haut, (Pellaud & Eastes, 2003), nous décrivions l'environnement didactique en l'illustrant par son application à une situation pédagogique relative à la présentation publique d'une expérience de « lévitation » (voir l'encadré ci-dessous) ; un thème qui permet d'aborder un grand nombre de notions touchant à de très multiples branches de la physique, tout en offrant la possibilité de les relier au quotidien des apprenants, qu'ils soient élèves ou public d'une activité de vulgarisation.

Se plaçant d'entrée sur un mode ludique et spectaculaire, un médiateur arrive en jonglant avec trois balles, expliquant qu'il tente de les maintenir en « suspension » dans l'air autant que possible. L'une d'entre elle s'échappe et, découragé, il avoue son impuissance au public : impossible d'empêcher les objets de tomber…

Il engage alors une discussion, sorte de « brain-storming », en questionnant le public sur les différents moyens qu'il serait possible d'imaginer pour contrer cette tendance des objets à se précipiter vers le « bas » lorsqu'on ne les maintient pas en « altitude » par le contact.

Cette phase est l'occasion de définir les termes utiles (masse, attraction gravitationnelle, poids, « haut » et « bas », pesanteur, apesanteur, lévitation…) et de faire émerger les conceptions du public sur ces concepts.

Il tente alors de faire élaborer collectivement une définition de la notion de « lévitation », jusqu'à ce quelle intègre les deux idées suivantes :

- *Pour qu'il soit considéré « en lévitation », l'altitude d'un objet doit être maintenue constante dans le temps ;*
- *Aucun contact solide ne doit s'exercer sur lui.*

Guidé par le médiateur, le public doit parvenir à distinguer trois types de forces susceptibles d'assurer la lévitation d'un objet au sens défini ci-dessus :

- *Les forces d'inertie (satellite, balle de fusil, toupie…) ;*
- *Des forces liées au mouvement de l'objet ou d'une partie de l'objet (avion, hélicoptère, effet Venturi…) ;*
- *Des forces statiques (magnétisme permanent, électrostatique, poussée d'Archimède…).*

A l'occasion, certaines idées (termes entre parenthèses ci-dessus) sont illustrées par des expériences variées et spectaculaires qui mettent en œuvre les diverses caractéristiques du phénomène de lévitation.

L'environnement didactique était alors décrit en des termes rappelés dans les encadrés suivants (traductions françaises de l'article publié en anglais).

POUR TRANSFORMER SES CONCEPTIONS, L'ELEVES DOIT :

3.3.4.1. Trouver du sens aux savoirs abordés, être motivé

Quels sont les intérêts de l'apprenant, en fonction de son âge, de son milieu de ses connaissances et expériences antérieures ? De telles indications, obtenues à travers le dialogue et l'établissement d'une relation de confiance entre apprenants et enseignant apportent à ce dernier des pistes intéressantes pour contextualiser le sujet, poser des questions qui susciteront l'intérêt, la curiosité et qui, tout en étant à la portée de l'apprenant, le pousseront à aller chercher « plus loin », à se sentir en même temps concerné par le sujet abordé et assez interpellé pour dépasser ses propres conceptions.

Diverses pistes sont possibles, dont la séquence de médiation proposée ci-dessus fournit divers exemples : l'enseignant peut partir de la simple observation de phénomènes quotidiens, spectaculaire ou non. La fascination qu'exerce la notion de « lévitation » est en particulier propice à la stimulation de l'intérêt des élèves. L'enseignant peut également faire appel à l'histoire des sciences, qui situe le savoir dans son contexte social et temporel, redonnant à la « découverte » sa véritable dimension. Mais il peut aussi partir d'un événement de l'actualité en commençant par la lecture d'un article de presse ou la projection d'une émission de télévision.

D'une manière générale, l'élève doit se sentir concerné par le sujet traité, sans quoi il ne sera pas motivé. Or la motivation est à la base de l'ensemble du processus d'apprentissage. D'où la pertinence de la phase de « brain-storming », destinée à « impliquer » dès le départ les apprenants dans le processus d'acquisition des connaissances qui suivra.

3.3.4.2. Se confronter - être perturbé, déstabilisé, confronté à d'autres réalités

Pour favoriser l'apprendre, « *il faut aussi inquiéter la raison et déranger les habitudes de la connaissance objective* » affirme Bachelard (1938). Ces paramètres sont importants car, comme les conceptions sont les seuls « outils » que l'élève a à sa disposition pour comprendre le monde qui l'entoure, il s'y accroche fortement. Il doit donc être mis dans une situation qui lui permette de voir les limites de son propre raisonnement. Ce n'est que dans ces conditions qu'il verra la nécessité d'abandonner ses conceptions pour de nouvelles, plus opératoires.

Pour ce faire, des situations de « confrontation » sont tout à fait favorables, idée qui trouve son apogée avec l'idée du conflit sociocognitif (Vygotsky, 1933 ; Gilly, 1989, Joshua & Dupin, 1993), suscité par la mise en présence de différentes opinions défendues par des pairs lors de débats, de situations où l'élève est amené à défendre ses idées, à argumenter. La définition de la notion de lévitation dans la situation pédagogique évoquée plus haut constitue une phase de confrontation et d'élaboration en commun extrêmement porteuse, car elle assure des débats passionnés, tant il est délicat de définir scientifiquement une notion employée usuellement pour décrire un phénomène « paranormal ».

Mais la perturbation peut également naître de la confrontation de l'élève avec le réel à travers des démonstrations ou des expériences qu'il réalise lui-même, voire avec le savoir lui-même, à travers les médias, les manuels, des rencontres avec des scientifiques… A ce titre, les expériences surprenantes telles que les expériences contre-intuitives (Eastes & Pellaud, 2004 b) seront particulièrement efficaces pour le questionner et l'interpeller : dans le cadre de l'étude de la lévitation, le maintien d'une balle de ping-pong dans le flux d'air vertical d'un sèche-cheveux fournit un exemple particulièrement intéressant de ce type d'expériences.

3.3.4.3. Avoir confiance, oser se « lâcher », être accompagné

Si la perturbation est un outil idéal pour ébranler le système cognitif de l'élève (Giordan, 1996 b, 1998), elle peut également devenir un obstacle si elle provoque une trop forte déstabilisation ou si l'élève se sent « abandonné », durant ce moment d'intense émotion, voire d'angoisse (Yanni-Plantevin, 1998), que provoque la transformation des conceptions. Il s'agit donc pour l'enseignant de créer un climat de confiance, afin que l'élève ose se « lâcher » : « *Faites-vous aimer d'eux ; qu'ils soient libres avec vous, et qu'ils ne craignent point de vous laisser voir leurs défauts* », disait déjà Fénélon en 1809.

La confiance en soi ne peut s'acquérir qu'à travers l'établissement d'une relation saine entre enseignant et enseigné et au sein du groupe classe, et pour ce faire, il existe quelques paramètres importants. Le premier est la possibilité pour l'élève de s'exprimer sans risque de jugement. Le second est le droit à l'erreur. Une erreur n'est pas un échec, et comprendre d'où vient celle-ci est souvent bien plus porteur que la réussite dès le premier essai… surtout si c'est par hasard !

Là encore, la phase de discussion ou « brain-storming » proposée dans l'étude de la lévitation permet un accompagnement permanent par le médiateur lors de l'émergence des conceptions du public : on s'apercevra notamment que pour certaines personnes, c'est parce que l'air « appuie » sur les objets qu'ils sont maintenus au sol, idée qui sera valorisée par le médiateur par un questionnement sur l'origine de cette idée, probablement liée aux connaissances que possède le public sur la notion de pression. Revenant sur la démonstration de jonglage, le médiateur peut également interroger le public sur les « forces » qui s'exercent sur les balles lors des différentes phases de leur mouvement. Ce faisant, il pourra faire émerger les conceptions fausses usuelles qui se manifestent notamment par l'évocation d'une force verticale dirigée vers le haut dans la phase ascendante des balles. Imaginant des expériences ou des raisonnements pour infirmer ces hypothèses, ou mieux, laissant le public en imaginer lui-même, il stimulera à la fois sa confiance en soi et son intérêt pour le sujet.

Notons en outre que si l'erreur ou, d'une manière plus générale, l'ignorance, est relevée comme un élément important de l'apprendre, elle peut s'avérer un outil utile dans la construction de la relation entre enseigné et enseignant, surtout si ce dernier sait avouer ses propres limites (Fénélon, 1809 ; Bachelard, 1938) et reconnaître qu'il peut également apprendre de l'élève.

Enfin, troisième paramètre, l'évaluation. Plutôt que de proposer systématiquement des évaluations sommatives, axées principalement sur la mémorisation de notions, travailler sur la base d'évaluations formatives, voire d'auto-évaluations peut s'avérer très porteur.

Dans une telle optique, l'enseignant n'est plus celui qui détient le pouvoir grâce à son savoir. Il devient un « facilitateur » (Pestalozzi, 1802 ; Rogers, 1969), un « accompagnateur » (Rousseau, 1762 ; Cousinet, 1950), un « médiateur » (Raynal & Rieunier, 1997 ; Rezeau, 2001) ou un « guide » (Montessori, 1958).

Il n'intervient plus comme « transmetteur » de savoirs, mais comme « organisateur » des conditions d'apprentissage, maintenant un juste équilibre entre perturbation et accompagnement, un excès de l'un ou de l'autre de ces paramètres pouvant bloquer le processus.

Gérer le temps de l'apprendre est également un rôle fondamental de l'enseignant ; une nécessité déjà relevée par Rousseau dans *l'Emile* (1762) : « *Oserai-je exposer ici la plus grande, la plus importante, la plus utile règle de toute l'éducation ? Ce n'est pas de gagner du temps, c'est d'en perdre*. »

3.3.4.4. Savoir imaginer, oser innover

« *On oppose souvent à toute pédagogie fondée sur l'imaginaire que l'imagination n'est pas utile et qu'elle est même nuisible à la formation scientifique et pratique dont l'homme a surtout besoin de nos jours* » (Jean, 1976). Or, plus que toute chose, l'imagination aide à la compréhension du monde réel et scientifique. C'est à travers elle que l'élève peut dépasser le connu et oser s'aventurer dans l'inconnu. C'est l'imagination qui va lui permettre d'émettre des hypothèses et de prendre assez de recul pour trouver des solutions non évidentes à un problème donné.

C'est ainsi que des solutions extrêmement originales au problème de la lévitation pourront prendre forme dans l'esprit des élèves, comme par exemple lors de l'évocation d'un phénomène apparemment sans lien avec le sujet : la poussée d'Archimède. Qu'elle s'exerce dans l'eau ou dans l'air, elle sera l'occasion pour l'élève de tester des hypothèses audacieuses et imaginatives.

3.3.4.5. Pouvoir mobiliser ses savoirs, les articuler autour de concepts organisateurs

Pour qu'un savoir devienne réellement opérationnel, l'apprenant a besoin de « l'utiliser ». A l'enseignant de lui offrir des situations dans lesquelles il puisse le réinvestir. Ce réinvestissement permet souvent à l'apprenant de tisser des liens entre les savoirs pré-existants et les disciplines et de comprendre les interactions en jeu, notamment lorsqu'il s'articule autour de « concepts organisateurs » (Giordan & Pellaud, 2002), intégrateurs (Haguenauer, 1996) ou structurants comme les envisage Ausubel (1966) en parlant d'« organizers ». Cette mobilisation, au-delà de la simple notion de « transfert » (Meirieu, 1998 ; Meirieu & Tardif, 1998 ; Develay, 1998) exige d'être capable de reconnaître le similaire dans le différent, de se détacher de la réalité, de prendre du recul et de parvenir à une forme d'abstraction. Différentes approches pédagogiques permettent de mettre l'élève en situation de réinvestissement. En permettant aux élèves d'utiliser leurs compétences spécifiques dans le travail de groupe (Blaye, 1989), en favorisant les mises en relation et les interdépendances issues de travaux sur des sujets transversaux et interdisciplinaires, tels que le proposait déjà Coménius au XVIIeme siècle, l'enseignant favorise cette indépendance de l'esprit. D'autres voies pratiques, telles que l'enseignement à d'autres, la mise en place d'une exposition, d'un jeu de rôle, participent à habituer l'apprenant à décontextualiser puis recontextualiser un savoir de manières différentes.

Ainsi, durant de la séquence sur la lévitation, lors de la présentation de l'expérience de la chute de l'aimant dans un tube de cuivre (métal pourtant non magnétique) ralenti par une induction électromagnétique puissante, l'élève sera à la fois incité à relier le phénomène au principe du ralentisseur électromagnétique des camions et à comprendre les implications énergétiques du phénomène, reliant par exemple l'énergie prise à la chute de l'aimant, à l'énergie lumineuse dissipée par l'ampoule d'un vélo alimenté par une dynamo. Au niveau de l'enseignement supérieur, l'étude des liens entre la lévitation de la balle de ping-pong citée plus haut et la sustentation des avions peut être elle aussi extrêmement… porteuse.

3.3.4.6. Elaborer, réfléchir sur ses propres savoirs

Bien que les systèmes scolaires actuels continuent à « empiler » des savoirs disparates et parfois anecdotiques, il est reconnu qu'apprendre ne se limite pas à acquérir des connaissances. Néanmoins, celles-ci restent importantes, ne serait-ce que pour développer la curiosité et l'esprit critique, pour autant qu'elles ne soient pas imposées de façon dogmatique.

Les attitudes nécessaires pour développer cet état d'esprit (esprit critique, curiosité, confiance en soi) ne peuvent apparaître sans réflexion et prise de recul issues de savoirs sur le savoir. Elles ne peuvent pas non plus émerger sans certaines compétences, telles que les approches analytiques, systémiques, expérimentales, etc. Ces différents types de savoirs sont totalement interdépendants et ne peuvent se développer que simultanément.

Lors de la présentation d'expériences aussi spectaculaires que technologiques que sont la lévitation d'un aimant au dessus d'un supraconducteur baignant dans l'azote liquide, ou la formation de pointes dans un liquide ferrofluide, les connaissances présentées ne pourront avoir de sens que si elles sont rapportées à l'utilisation qu'il est possible de faire de ces matériaux (trains à sustentation électromagnétique, billets de banque infalsifiables…). De même, l'évocation des implications technologiques que cette utilisation présente, celle des aspects économiques ou même éthiques liés à

leur mise en œuvre, contribueront à proposer, en plus des connaissances académiques, une réelle réflexion sur la science et ses enjeux.

Il incombe donc à l'enseignant de proposer des situations qui permettent à l'élève de tisser des liens entre les savoirs à travers des méthodes et par des outils diversifiés et appropriés. Cet élément conduit tout naturellement au dernier paramètre mentionné dans cet environnement didactique : les aides à penser.

3.3.4.7. S'approprier des aides à penser

Les aides à penser telle que les définit Giordan (1998) consistent en tout ce que l'enseignant peut proposer, en matière de supports d'informations ou de méthodes, pour rendre l'apprendre plus accessible. Dans le cadre de la séquence décrite ci-dessus comme dans n'importe quelle situation de médiation, du cours frontal à la démarche expérimentale en passant par le travail de groupe, la visite de musée, l'intervention d'un spécialiste, la recherche d'informations (Internet, ouvrages, médias), le projet, la définition d'objectifs, la création d'un spectacle, l'utilisation de jeux, de simulation, de modèles, l'élaboration de conceptogrammes, les métaphores, les histoires… tout est nécessaire pour offrir le maximum de chances à l'apprenant d'accéder aux savoirs et de transformer ses conceptions.

Ainsi l'environnement didactique de 2002 montre comment faire en sorte que les apprenants construisent peu à peu leur savoir en lui donnant du sens, en le renforçant et en établissant des liens entre leurs connaissances. L'importance d'une telle approche réside surtout dans l'autonomie qu'acquiert l'apprenant face à son propre apprentissage, cette autonomie devant l'aider à développer un esprit critique en même temps qu'une imagination créatrice, capable de l'aider à dépasser les cadres de pensée proposés, non seulement par l'enseignant, mais par l'école d'une manière générale.

3.3.5. Analyse critique de l'approche allostérique de 2002

Comme la théorie du changement conceptuel, le modèle allostérique peut être analysé de manière critique sur divers plans : épistémologique et méthodologique (en lien avec son ontologie et sa scientificité), scientifique (en lien avec la précision, la pertinence et la cohérence de son contenu), théorique (au regard de sa fécondité) et pédagogique (en lien avec sa capacité à rendre compte des observations et à produire des outils pertinents pour la pratique). Sa compatibilité avec les sciences cognitives pourra également être étudiée, ce que nous entreprendrons de faire après la description des apports théoriques et expérimentaux de ces dernières ; nous nous limitons pour le moment aux aspects par lesquels nous avons analysé plus haut la théorie du changement conceptuel.

3.3.5.1. Ontologie et scientificité

Une inquiétude susceptible de survenir à la découverte de l'approche *allostérique* tient à sa formulation métaphorique. Comme toutes les « bonnes » métaphores, on pourrait craindre que celle de l'allostérie soit aussi trompeuse du point de vue de sa pertinence et de sa scientificité qu'éclairante de point de vue de la compréhension immédiate. Le caractère très controversé du succès de la théorie mémétique par exemple, initiée par le dernier chapitre de l'ouvrage de Dawkins (1989), *Le gène égoïste*, est là pour nous rappeler le risque inhérent à cette approche.

Mais il est important de rappeler que la métaphore de l'allostérie n'a pas été préalable à la formulation du modèle et n'en tire pas son origine, ce qui devrait suffire à dissiper les craintes éventuelles. Pourtant, nous pensons que la métaphore est si féconde et pertinente qu'elle pourra être développée en analogie ; en vertu des inquiétudes légitimes liées à la transposition de théories physicalistes aux sciences humaines, nous prendrons bien évidemment le temps et toutes les précautions nécessaires pour justifier ce procédé.

Du point de vue de sa scientificité, le modèle allostérique se nourrit d'inspirations plus variées que la théorie du changement conceptuel, fut-elle un habile mariage entre les travaux de Kuhn et de Piaget. Moins restreint dans sa vision de l'apprentissage, il est également moins critiquable. Constitue-t-il pour autant une théorie scientifique ?

Au niveau de son pouvoir prédictif et de la reproductibilité de ses observations, il semble vérifier les critères nécessaires. La démarche employée pour sa conception, bien que très empirique, s'appuie sur des observations précises conduites en classe et sur des références bibliographiques sérieuses. La théorie est également évolutive et sait se nourrir de toutes les données scientifiques nouvelles. Peu d'indications nous sont en revanche données sur sa falsifiabilité, la confrontation de la théorie avec l'expérience ayant surtout porté sur la validation de l'environnement didactique (Giordan & Pellaud, 2008) associé plutôt que sur le modèle d'apprentissage proprement dit.

La scientificité d'une théorie réside enfin, à notre sens, dans la validation et la reconnaissance qu'elle reçoit de la part de la communauté scientifique internationale. A cet égard, le modèle allostérique peine à accéder à ce statut par manque de publications dans des revues anglophones à comité de lecture.

3.3.5.2. Pertinence théorique et cohérence

- Les conceptions

Par rapport aux autres théories éducatives, et en particulier par rapport à la théorie du changement conceptuel, le modèle allostérique permet en premier lieu de mieux cerner la notion de « conception » en fournissant, comme nous l'avons vu, de larges descriptions de leurs manifestations et en montrant, grâce à la métaphore de l'iceberg notamment, qu'elles ne sont pas seulement de simples représentations mentales qu'il suffirait de faire exprimer par les élèves pour pouvoir les modifier. Bien au contraire, si certaines vérifient ces caractéristiques, d'autres – qu'elles soient justes ou fausses – constituent souvent en premier lieu des éléments robustes du système d'interprétation du monde des individus, qu'ils auront à ce titre beaucoup de difficulté à faire évoluer. Pour reprendre la métaphore de la maison évoquée plus haut, on conçoit bien qu'il soit difficile de déplacer un mur porteur, quand bien même il aurait été monté de travers. En second lieu, la plupart d'entre elles ont des soubassements inconscients, très ancrés, parfois acquis dans la plus tendre enfance, ce qui rend leur expression difficile.

Cette description des conceptions rend caduques les pédagogies constructivistes traditionnelles dans certains cas difficiles, et notamment avec les enfants en grande détresse scolaire dans les moyens et grands niveaux. Elle conduit également nécessairement à la prise de conscience du fait que certaines conceptions doivent être déconstruites, et que l'entreprise s'avérera toujours ardue. Là encore, et comme nous l'avons vu, la théorie du changement conceptuel insiste peu sur cette difficulté.

- Ecologie conceptuelle, socle et espace des conceptions

En terme de description des conceptions, donc, ce modèle semble le plus avancé, même s'il sera nécessaire d'introduire, d'une manière ou d'une autre, l'idée de règles d'utilisation des conceptions, et avec elle la possibilité de leur *activation*. Absente du modèle allostérique, cette préoccupation apparaît dans certains développements de la théorie du changement conceptuel à travers la notion de *p-prims* (littéralement *primitives phénoménologiques*). Comme nous l'avons vu plus haut, diSessa (1993) imagina en effet l'existence de *p-prims* particulières servant à l'activation spécifiques d'autres *p-prims*, ces dernières traitant elles seules l'information.

Cette question de l'activation des règles d'utilisation des conceptions ne devra pas être négligée : derrière elle se cache notamment celle de l'existence des chemins de pensée de type réflexe, qui sont parfois empruntés par erreurs dans des situations de stress et conduisent vers des conceptions

inappropriées, sans pour autant que la conception adaptée soit inexistante. Une question qui en entraîne une troisième : celle de l'inhibition de ces chemins de pensée erronés, qui conduit naturellement à s'interroger également sur l'existence de processus de *désactivation* complémentaires à l'activation des *p-prims* de diSessa.

A travers ce concept de *p-prims*, diSessa marque plus nettement que le modèle allostérique la distinction entre les idées naïves issues de l'imprégnation au contact du monde et les conceptions construites par des apprentissages ultérieurs. Nous verrons plus loin qu'en matière de connaissances naïves, une distinction complémentaire, apportée par les sciences cognitives cette fois, sera nécessaire.

De même, bien que contestée, l'idée d'*écologie conceptuelle* développée par Posner *et al.* dans leur article *princeps* présente l'intérêt de suggérer l'existence d'un espace de conceptions, pour le moment absent du modèle allostérique, dont il convient alors d'imaginer les caractéristiques : socle de connaissances naïves, règles d'activation/inhibition des conceptions, structure dynamique du savoir…

Nous reviendrons à la fois sur la description des règles d'activation des conceptions, sur celle de l'inhibition des chemins de pensée erronés et sur celle d'un socle et d'un espace des conceptions (mais sans pour autant utiliser l'expression ambigüe d'*écologie conceptuelle*), en invoquant conjointement le concept d'heuristique (Tversky & Kahneman, 1974 ; Kahneman *et al.*, 1982), la notion d'inhibition mentale (Houdé, 2004) et les théories naïves en sciences cognitives (Gilmore *et al.*, 2007).

- La transformation des conceptions

Même s'il donne peu d'indications sur sa véritable nature en termes de processus cognitifs, c'est la grande force du modèle allostérique que de substituer cette idée de « déconstruction-reconstruction » à celle de « changement » des conceptions, elles-mêmes vues comme le seul système interprétatif à la disposition de l'apprenant, ce qui le conduit le plus souvent à adapter l'information reçue plutôt que ses propres connaissances, comme l'explicite la figure 19. C'est probablement à ce stade qu'émerge la fécondité du modèle : en montrant que la transformation des conceptions issue de cette déconstruction-reconstruction est un processus plus difficile que les pédagogies constructivistes traditionnelles ne le laissent entendre, il oblige en même temps à imaginer tous les moyens possibles pour le faciliter.

Il ouvre alors un champ de réflexions large et complexe, où doivent être considérés simultanément la réflexion sur les soubassements inconscients de la pensée (niveau infracognitif), le savoir lui-même (niveau cognitif), le rapport de l'apprenant à ses propres savoirs (niveau métacognitif), sa motivation à apprendre (niveau intentionnel) et les affects qui l'influencent lors de ces processus (niveau émotionnel). Autant d'aspects qui sont actuellement développés par Giordan (Golay *et al.,* 2010) et que nous aborderons plus loin, même si nous ferons porter l'essentiel de notre formalisation sur le niveau cognitif. On pressent, par suite, la nécessité de construire un, voire plusieurs environnements didactiques, destinés à tenir compte de ces paramètres dans le design de pédagogies conformes à ces considérations théoriques.

Une limite du modèle serait peut-être toutefois de considérer, ou de laisser penser, que tout apprentissage nécessite une déconstruction, en supprimant totalement la dimension empiriste, behavioriste ou constructiviste traditionnelle de certaines acquisitions de connaissances ; un point sur lequel nous reviendrons.

- La stabilité des conceptions

Comme nous l'avons vu, Giordan mentionne souvent la propension des conceptions nouvellement acquises à s'effacer après quelques temps pour laisser réapparaître les anciennes. Ce phénomène pose la question de leur stabilité, qui nous semble devoir être davantage explicité que cela n'a été fait jusqu'en 2002. En particulier, une liste la plus exhaustive possible de l'ensemble des paramètres

régissant cette stabilité nous semble devoir être dressée, et leurs impacts relatifs évalués. La formalisation que nous proposerons plus loin devrait permettre de s'en acquitter.

- L'environnement didactique

Si le schéma de l'environnement didactique de 2002 présente l'immense avantage, par rapport à bien d'autres « méthodes » et « préceptes » pédagogiques, de ne pas proposer de recette mais un ensemble de paramètres à considérer conjointement selon une approche systémique, il souffre d'un lien trop ténu, car empiriquement construit, avec le modèle d'apprentissage auquel il est associé. Lever cette limitation constituera un objectif fort de notre étude.

3.3.5.3. Fécondité théorique

D'un point de vue théorique, la plupart des aménagements réalisés au sein du modèle allostérique ont été produits par le laboratoire où il était né ; notamment faute d'une diffusion dans la communauté scientifique internationale, qui lui aurait permis de s'émanciper en initiant de nouveaux travaux, comme ce fut le cas de la théorie du changement conceptuel. C'est probablement parce qu'il a été davantage diffusé dans les milieux enseignants que dans la communauté des chercheurs que l'on peut davantage parler « d'approche » que de « théorie » allostérique. Toutefois, nous considérons que ce modèle possède, en lui-même, cette capacité à être développé théoriquement et à initier des recherches précises, notamment au regard des concepts qu'il est susceptible de proposer aux sciences cognitives en vue de leur explicitation expérimentale. C'est l'une des raisons pour lesquelles nous avons choisi d'explorer cette voie en faisant de la théorisation du modèle allostérique un objectif fort de cette thèse.

3.3.5.4. Ampleur descriptive et pertinence pédagogique

D'un point de vue pratique et général, en insistant sur l'importance du processus de « déconstruction-reconstruction » et non plus seulement sur l'idée constructiviste selon laquelle on apprend « à partir de » ce que l'on sait déjà, ce modèle est susceptible de modifier assez largement les modèles d'apprentissage implicites des enseignants et des médiateurs. Il les conduit en effet à accepter comme un phénomène normal l'idée que les savoirs acquis par l'apprenant ne soient pas déjà bien organisés, à accepter que des connaissances aient été « mal apprises », voire aillent à l'encontre de nouveaux apprentissages... A ne pas s'en inquiéter, surtout. Il conduit en quelque sorte à un petit changement de paradigme qui permet également à l'enseignant de prévoir, à nouveau comme un phénomène *normal*, que ce qu'il enseigne sera restitué « de travers » par l'élève lors de la prochaine évaluation.

On peut imaginer qu'il en éprouve à la fois moins de ressentiment pour l'élève et moins d'inquiétude quant à sa capacité à enseigner, tant il est vrai que si son modèle implicite est empiriste, il aura toutes les raisons de s'émouvoir de n'avoir pas su convenablement emplir les cruches dont il a la charge (pour reprendre le bon mot d'Aristophane : « *Enseigner, ce n'est pas remplir des cruches, c'est allumer des brasiers* » (This, 2004)). Nous avons en effet pu constater, lors des diverses formations pour enseignants données sur le sujet, que le modèle allostérique avait la capacité d'imprégner les praticiens d'un état d'esprit différent, à la fois plus indulgent et plus serein.

Cet impact est d'autant plus fort que le modèle allostérique possède le puissant avantage d'être non seulement explicite et imagé, mais également opératoire et fécond. On ne compte plus, en effet, les ateliers lors desquels les visages des enseignants s'éclairent et les exclamations fusent, comme autant de signes qu'ils comprennent de quoi il est question et savent immédiatement l'associer à leurs propres pratiques, et qu'ils entrevoient immédiatement de nouvelles applications pédagogiques à mettre en œuvre.

En effet, un autre avantage de l'environnement didactique associé au modèle est l'approche systémique qu'il propose. Se nourrissant des préceptes de l'ensemble des théories éducatives[23], il ne se focalise ni sur un paramètre de l'apprentissage, ni sur un outil pédagogique donné, ni ne se perd dans des objectifs éducatifs d'ordres social ou politique. En rassemblant les différents éléments facilitateurs de l'acte d'apprendre, il conduit simplement à une approche pédagogique générale, adaptable à maintes situations d'enseignement, mais sans jamais prétendre constituer une panacée (dont Giordan écrit souvent qu'en matière d'enseignement, elle n'existe pas).

Même si elle dévoile que l'apprenant est seul auteur de ses apprentissages, l'approche allostérique n'en dépossède pas pour autant l'enseignant car, sans pour autant lui construire des protocoles directifs et des recettes toutes faites, elle constitue une sorte de boîte à outils pour penser les différentes manières d'aider les élèves à surmonter leurs difficultés d'apprentissage, dont la maîtrise par l'enseignant est aussi valorisante que délicate.

3.4. Les sciences cognitives

Comme nous l'avons évoqué plus haut, toute réflexion sur la pédagogie repose plus ou moins explicitement sur un modèle d'apprentissage. Andler (2008) va plus loin en considérant que, du point de vue académique, elle repose même sur une « théorie de la nature humaine ». Ainsi, parmi « *les moins métaphysiques – et les plus opératoires – les sciences de l'éducation se sont appuyées sur la psychologie scientifique : c'est pourquoi elles sont nécessairement concernées par l'émergence des sciences cognitives, dont l'ordre du jour inclut et étend celui de la psychologie* ».

Cette sous-partie entend explorer les rôles actuels et futurs que les sciences cognitives peuvent (et ne peuvent pas) jouer dans les réflexions sur la pédagogie, à la recherche d'une *evidence based education* (Kirsch, 2008). Les connaissances et modèles actuels nous serviront alors de guides et de moyens de contrôle dans la construction théorie de notre modèle allostérique formalisé. En ce sens, en proposant des modèles déterministes complémentaires à notre modèle phénoménologique, elles font partie du cadre théorique de notre étude.

3.4.1. Objet et outils

3.4.1.1. Définition

On croit trop souvent que les sciences cognitives se limitent soit à l'étude du cerveau, et en particulier à celle des localisations et des pathologies, soit à l'intelligence artificielle et au développement de logiciels d'aide à la décision, à l'apprentissage, etc. Dans le dictionnaire *Dixel* des éditions *Robert* (Eastes, 2009), nous définissions plus largement la cognition de la manière suivante :

> La *cognition* désigne les principales dispositions et capacités de l'esprit humain – perception, mémoire, langage, raisonnement, coordination motrice, planification de l'action – en tant que champ d'étude privilégié des sciences dites *cognitives*.
>
> Les études de la cognition humaine, ou sciences cognitives, ne se limitent pas à l'adulte sain. Elles explorent largement la cognition du nouveau-né et de l'enfant (psychologie du développement), ainsi que celle d'individus atteints de pathologies dues à des traumatismes, à des maladies ou à des anomalies congénitales ou de développement (neuropsychologie).
>
> Riches d'une approche très interdisciplinaire, elles ne se réduisent ni aux neurosciences, qui explorent le fonctionnement du système nerveux central, ni à la psychologie ou à la logique, qui visent à décrire les processus mentaux en tant que chargés de sens. La linguistique y joue par exemple un rôle

[23] Francine Pellaud (2002) a notamment montré que la plupart des éléments de l'environnement didactique de 2002 pouvaient être retrouvés, épars, dans les anciennes théories éducatives.

particulier, participant également des deux approches et fournissant des hypothèses précises sur la manière dont elles s'articulent. Elles sont complétées par la philosophie, l'anthropologie, l'éthologie cognitive (étude de la cognition animale) et par l'intelligence artificielle qui vise à constituer des formes de cognition artificielle.

Historiquement, ce courant de recherche est né d'une réflexion sur les processus logiques et leur production matérielle dans le cerveau, puis dans l'ordinateur : c'est l'époque de la cybernétique (Wiener, MacCulloch, Von Neumann) prolongeant, dans les années 1940-50, les grandes découvertes logiques des années 1930 (Turing).

L'ordinateur y a été utilisé à la fois comme image approchée de son propre fonctionnement et comme instrument de modélisation de ses propres opérations. Puis les sciences cognitives ont pris la figure d'une psychologie généralisée plutôt que d'une informatique appliquée. Elles sont aujourd'hui largement marquées par les neurosciences, notamment grâce aux développements des techniques d'imagerie cérébrale.

Une autre manière de définir les sciences cognitives (Andler, 2008) consiste à décrire les grandes oppositions sur lesquelles elles se construisent, ce que retrace le tableau 2.

<table>
<tr><td>Ordinateur</td><td>Animal</td><td colspan="3">Humain</td></tr>
<tr><td rowspan="3"></td><td rowspan="3"></td><td>Humain lésé</td><td colspan="2">Humain indemne</td></tr>
<tr><td rowspan="2"></td><td>Enfant</td><td colspan="2">Adulte</td></tr>
<tr><td></td><td>Jeune adulte</td><td>Adulte vieillissant</td></tr>
</table>

Tableau 2 : Emboîtement des polarités fondatrices des études cognitives. Une dernière polarité, non représentée, lie la cognition individuelle à une forme encore imprécise de cognition sociale ou distribuée.

3.4.1.2. Des études interdisciplinaires

Les sciences cognitives s'intéressent à des phénomènes aussi divers et conceptuellement complexes que la décision, la perception, l'action, le langage, les émotions, la conscience, le soi, les rapports à autrui, l'imagination, la dissimulation, le jeu, le récit, la culture, les valeurs, normes et préférences, etc. Cet ordre du jour, les sciences cognitives le poursuivent avec un outillage conceptuel qui comprend, mais excède de beaucoup, celui de la psychologie expérimentale classique. La logique et l'informatique, mais aussi bien la physique statistique, la psychologie du développement, les neurosciences, la linguistique, l'anthropologie, la paléontologie, l'éthologie, la théorie de l'évolution, les théories formelles de la rationalité, la philosophie elle-même sont mises à contribution. A cet égard, l'étude des équipes de recherche d'un département scientifique tel que l'*Institut d'Etude de la Cognition* (IEC)[24] à l'Ecole normale supérieure (Paris), qui se veut le plus interdisciplinaire possible, est également instructive en termes d'étendue des domaines de connaissances concernés :

- Neurosciences cognitives (*LNC*)
- Philosophie des sciences, logique, théorie de la décision (*Institut d'Histoire et de Philosophie des Sciences et des Techniques*)
- Philosophie du langage, philosophie de l'esprit, philosophie des sciences cognitives, philosophie des sciences sociales (*Institut Jean Nicod*)
- Audition, psychophysique, modélisation et neurosciences (*APMN*)

[24] www.cognition.ens.fr - Dernière consultation le 05/02/2013.

- Psychologie cognitive et psycholinguistique (*LSCP*)
- Neuropsychologie interventionnelle (*NPI*)
- Linguistique théorique (*Sigma*)
- Nouvelles technologies, éducation et cognition (*Compas*)
- Apprentissage, communication et éducation scientifiques (*Traces*)

Les sciences cognitives font en effet partie de ces nouveaux champs de recherche qui transgressent les frontières des disciplines traditionnelles pour s'attacher à un objet par tous les biais possibles (comme les sciences du web, du patrimoine, de l'éducation) plutôt qu'à une collection d'objets sous un biais unique (chimie, biologie, physique). Particulièrement représentatif du degré de maturation atteint par ce domaine, le site web du IEC indiquait en 2012 :

> Les sciences cognitives ont pour objectif de décrire, de caractériser, d'expliquer à différents niveaux, et dans certains cas de simuler les fonctions « mentales », entendues en un sens très large : pensée conceptuelle, raisonnement, langage, mémoire, mais aussi perception, motricité, action, voire conscience, émotions, rapport à autrui, activité artistique...
>
> C'est dire qu'elles reprennent non seulement les programmes de recherche traditionnels de la psychologie scientifique, des sciences du cerveau et de la linguistique, mais aussi certaines des questions centrales de la philosophie, en particulier de la théorie de la connaissance, et touchent aux sciences humaines et sociales de multiples façons. Héritières d'une longue tradition intellectuelle, à laquelle appartiennent de plein droit Aristote, Descartes, Leibniz, Kant, tout comme Helmholtz et Fechner, Darwin et Freud, Broca et Ramon y Cajal, Hilbert et Poincaré, von Neumann et Turing, Frege et Saussure, Piaget et Merleau-Ponty, etc. elles s'appuient sur des méthodes expérimentales relevant de la psychologie et des neurosciences, sur des instruments et sur des modèles physico-mathématiques et informatiques apparus au cours du dernier demi-siècle. Mais leur succès, dont témoigne leur présence dans la plupart des grandes institutions de recherche du monde, s'explique par le cadre conceptuel et méthodologique rigoureux qu'elles se sont donné, qui leur permet de tirer parti de ces progrès scientifiques et technologiques.

Andler, dont une bonne partie des travaux consiste justement à préciser les contours de ce qu'il nomme les « études cognitives » (2002, 2004, 2007a, 2007b), précise (2008) : « *Les sciences cognitives ont parfois été assimilées à l'intelligence artificielle, et leur projection sur le champ de l'éducation à l'enseignement assisté par ordinateur (EAO), peut-être intelligemment (EIAO). Dans une phase intermédiaire, elles ont été comprises comme une partie de la psychologie expérimentale consacrée à la « gestion » (ou au « traitement ») des connaissances, étudiant en laboratoire les stratégies mémorielles, l'apprentissage ou la résolution de problème. Aujourd'hui, elles tendent à être confondues avec la partie des neurosciences ou des sciences du cerveau qui s'appuie principalement sur l'imagerie fonctionnelle cérébrale pour répondre à des questions de localisation, dans une double perspective de repérage des déficits et de cartographie génétique des facultés. Or les sciences cognitives [sont] bien davantage que ces trois-là, [et] rien de moins que la poursuite de l'ordre du jour le plus général d'une psychologie conçue comme le déchiffrement des mécanismes et des lois de la vie mentale* ».

3.4.1.3. Les méthodes expérimentales

De par la tradition psychologique qui domine dans un des principaux courants traversant les sciences cognitives, ces dernières usent en premier lieu de toutes les méthodes usuelles utilisées en psychologie : entretiens, questionnaires, tests de compétences, études statistiques, etc. Mais elle peut également recourir à l'expérimentation et la mesure de paramètres physiques ou chimiques : temps de

réaction, rythmes cardiaques, sudation, trajet du regard (*eye tracking*, figure 21), attention et rythme de succion d'une tétine chez le nourrisson, mesure de la taille de la pupille (pupillométrie), mesure de l'audition (audiométrie)… Autant de mesures psychométriques dont l'enregistrement simultané permet des corrélations également instructives, et dont les appareils de mesure font l'objet de constantes améliorations grâce à l'électronique et à l'informatique, permettant par exemple des mesures temporelles de l'ordre de la milliseconde.

Figure 21 : Appareil d'eye tracking, exemple d'utilisation et résultat pour l'analyse de la lecture en saccades (appareil *Eyelink II* commercialisé par *SR-research*[25]).

Grâce aux progrès de la biologie, les sciences cognitives ont également directement accès au cerveau, à sa structure et à sa composition : des mesures physiologiques permettent donc d'étudier, chez l'animal essentiellement, les variations de paramètres tels que la masse, les quantités de matières grise ou blanche, la structure des circonvolutions, les réseaux de neurones ou les connexions entre les différentes parties du cerveau. L'implantation d'électrodes permet de mesurer l'activité cérébrale, mais cette technique n'est pas sans poser de sérieux problèmes éthiques et idéologiques, les images correspondantes étant largement exploitées par les antivivisectionnistes. Plus récemment, des mesures électriques directes conduites sur le cerveau humain ont pu toutefois être menées au cours d'opérations chirurgicales éveillées, permettant de localiser en temps réel des aires cérébrales importantes de manière à les épargner lors de l'ablation de tumeurs[26].

Les premières de ces méthodes sont efficaces, souvent faciles à mettre en œuvre (en dépit du prix élevé de certains appareillages comme les *eye trackers*) et ne nécessitent que des pièces aménagées permettant d'accueillir les sujets testés. Elles ne produisent toutefois que des mesures très indirectes de l'activité cérébrale, qui nécessitent des traductions complexes et limitées. Les secondes permettent un accès direct au cerveau, mais de manière invasive, ce qui ne les rend utilisables que dans des cas très spécifiques. Une troisième catégorie de mesures conserve l'avantage de l'accès (presque) direct à l'activité cérébrale, sans présenter l'inconvénient des interventions invasives ; les appareillages nécessaires ont été développés spécifiquement pour les études cognitives et sont à l'origine des avancées actuelles les plus spectaculaires, bien qu'il soit encore parfois difficile d'interpréter les données qu'ils produisent. On regroupe l'ensemble de ces procédés sous le terme générique d'*imagerie cérébrale* ; ils permettent d'obtenir des aperçus de l'intérieur du cerveau par des images qui ne sont pas des photographies, mais des reconstitutions dépendant de divers paramètres physiques. Les techniques d'imagerie permettent d'étudier aussi bien la structure que le fonctionnement du cerveau.

25 www.sr-research.com/solutions.html - Dernière consultation le 05/02/2013.

26 Voir par exemple la vidéo produite par Le Monde et Universcience.tv, disponible sur www.youtube.com/watch?v=MtIEGuEMQmY - Dernière consultation le 05/02/2013.

- L'électroencéphalographie (EEG)

Cette technique permet la mesure, directement à partir du scalp, des courants électriques produits par l'activation de réseaux de neurones. Ces signaux faibles (de l'ordre du microvolt) sont généralement captés par le biais d'électrodes fixées sur le cuir chevelu et visualisés à l'aide d'appareils très sensibles. Les signaux captés à la surface du crâne (figure 22a) ne permettent toutefois qu'une détermination indirecte de la région cérébrale qui les a produits. Ce n'est donc que depuis quelques années que l'EEG a été suffisamment affinée pour en faire une méthode utilisable en imagerie, à la fois facile à mettre en œuvre et très prometteuse. La condition nécessaire à la localisation des aires cérébrales actives est toutefois l'utilisation d'un grand nombre d'électrodes (jusqu'à plus de 100).

Le terme « potentiel évoqué » (figure 22b) désigne particulièrement le signal électrique produit par le système nerveux en réponse à une stimulation externe (son, lumière) ou interne (prise de décision, préparation motrice). On parle ainsi également de la « technique des potentiels évoqués », qui consiste à superposer plusieurs enregistrements pris dans des conditions identiques afin d'atténuer le bruit et les artéfacts de la mesure.

L'un des gros avantages de l'EEG est d'être d'une utilisation pour ainsi dire exempte de risques. Elle mesure, en effet, des signaux qui sont produits par le cerveau lui-même et donc sans qu'une excitation d'origine externe – qu'il s'agisse de rayonnements ou de substances chimiques – soit nécessaire.

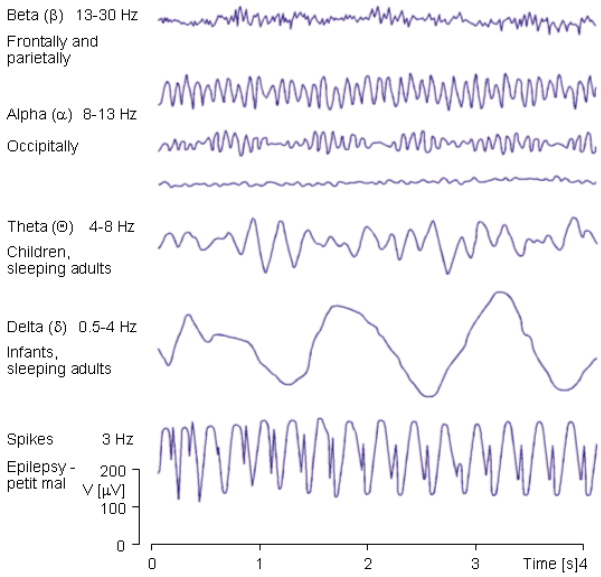


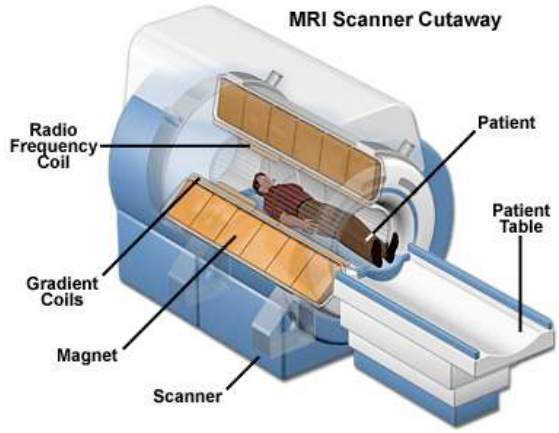
Figure 22 : a/ Utilisation de la technique d'électroencéphalographie non invasive sur un enfant de 6 mois.
b/ Exemples de signaux obtenus par cette technique.

- La tomographie par résonance magnétique (TRM ou IRM)

Souvent appelée IRM (imagerie par résonance magnétique), cette méthode produit les images les plus précises pour examiner la structure du cerveau. Elle mesure les signaux générés dans le corps par un champ magnétique extrêmement fort (1,5 à 3 T, de l'ordre de 50 000 fois celle du champ magnétique terrestre) en combinaison avec des ondes radio.

Lorsqu'une personne est exposée à un champ magnétique d'une telle intensité (figures 23a et 23b), les spins des noyaux des atomes d'hydrogène de son corps s'orientent dans une certaine direction. Or l'hydrogène est un composant de la molécule d'eau et donc de tous les tissus humains. On recourt alors à des ondes radio pour induire ces noyaux à émettre des signaux : en général, un second champ magnétique, oscillant mais plus faible, leur est appliqué brièvement, ce qui a pour effet de retourner leur spin. Le processus de relaxation induit alors un courant électrique dans une bobine, dont la

fréquence est caractéristique de l'environnement proche de l'atome concerné. Les informations obtenues par ce biais permettent à leur tour d'établir des images très détaillées du tissu étudié (figure 23c).



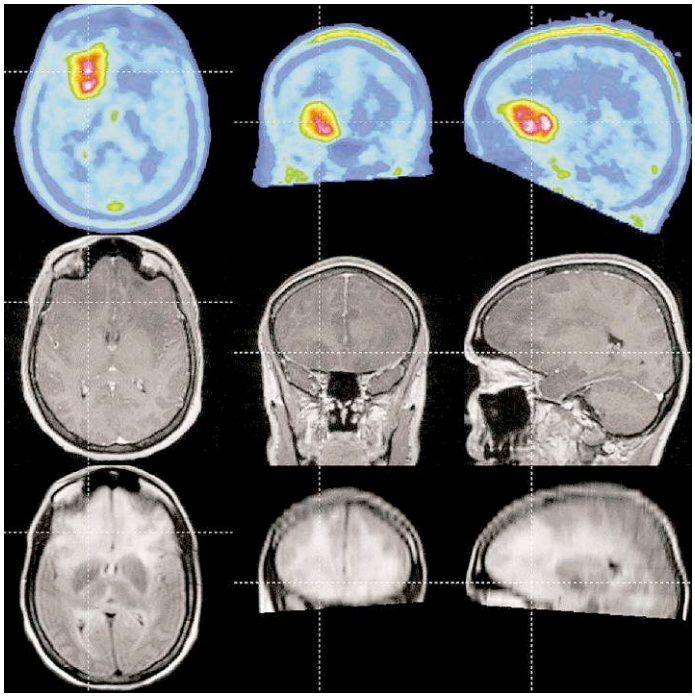


Figure 23 : a et b/ Appareillage utilisé en TRM et principe.
c/ Exemples de clichés obtenus par cette technique.

- L'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf ou fMRI)

L'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) est devenue l'une des principales méthodes d'investigation des neurosciences cognitives (figures 24a et 24b). Le principe de mesure est le même que celui de l'IRM mais ce ne sont plus les signaux des atomes d'hydrogène que les appareils repèrent. L'hémoglobine assure le transport de l'oxygène dans le sang, notamment vers le cerveau. Or lorsqu'elle cède son oxygène, ses propriétés magnétiques changent. C'est ce phénomène qui est mesuré par l'IRMf. Elle permet par suite la mesure dans le cerveau des différences de répartition entre l'hémoglobine chargée en oxygène et celle qui ne l'est pas.

Pour assurer son fonctionnement rapide et efficace, les régions particulièrement actives du cerveau reçoivent beaucoup de sang oxygéné ; il est ainsi possible d'extraire des informations sur le fonctionnement du cerveau de ses processus métaboliques, en suivant notamment dans le temps les profils d'activation des aires cérébrales tout au long de la réalisation d'une tâche particulière. La pertinence de ces résultats est toutefois quelque peu diminuée par le caractère très indirect des mesures : la circulation de l'oxygène dans le cerveau n'est en effet qu'une conséquence de l'activité des cellules. Le lien entre cette dernière et la teneur en oxygène du sang est néanmoins jugé suffisant pour assurer le bien-fondé des déductions.

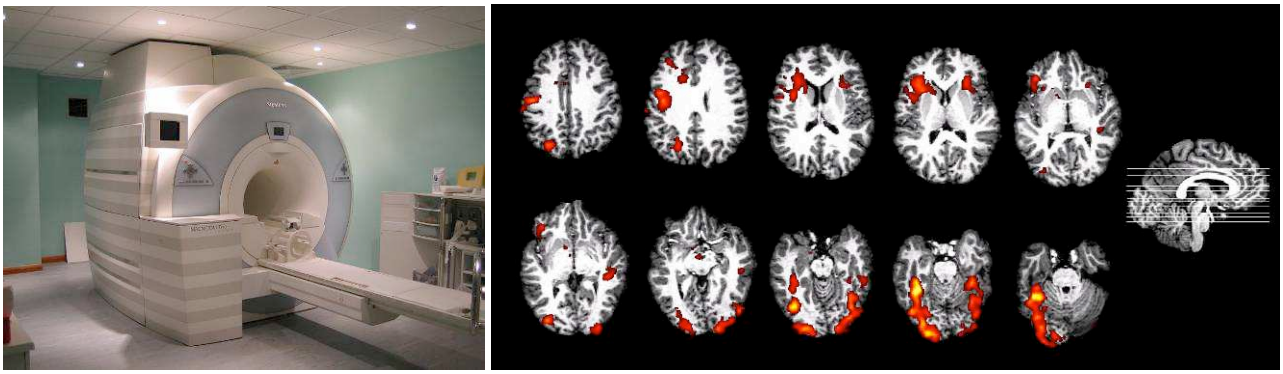


Figure 24 : a / Appareillage utilisé en IRMf.
b/ Exemples de clichés obtenus par cette technique.

- La tomographie par émission de positrons (TEP)

La TEP permet de détecter les activités métaboliques tissulaires. A cette fin, l'appareil (figure 25a) mesure les signaux émis par des traceurs radioactifs, introduits dans l'organisme des sujets d'expérimentation juste avant de procéder aux mesures. Acheminés par l'appareil circulatoire, ils atteignent le cerveau en quelques dizaines de secondes. Leur décroissance radioactive engendre alors un rayonnement qui est mesuré par l'appareil.

Les données ainsi recueillies peuvent servir à calculer aussi bien des images en coupe transversale que des vues tridimensionnelles du tissu dans lequel le traceur a circulé (figure 25b).

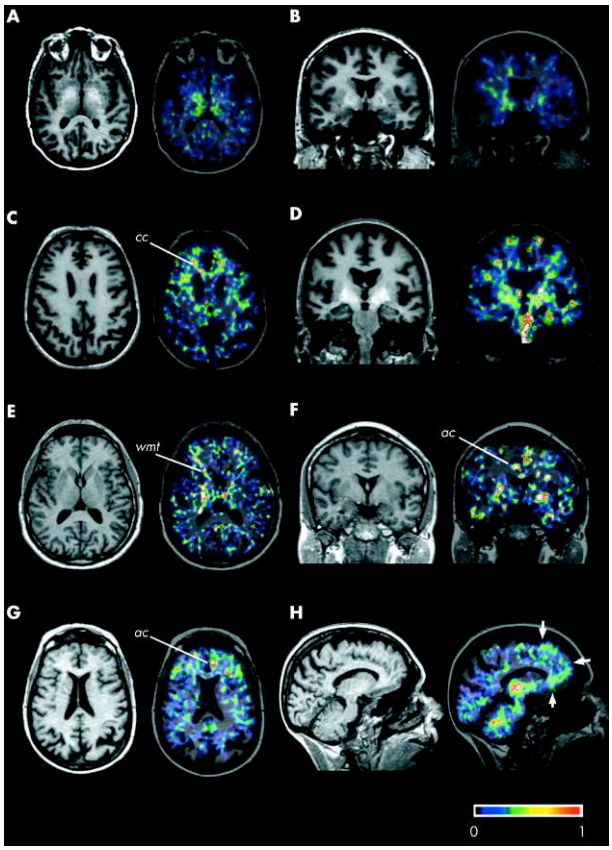
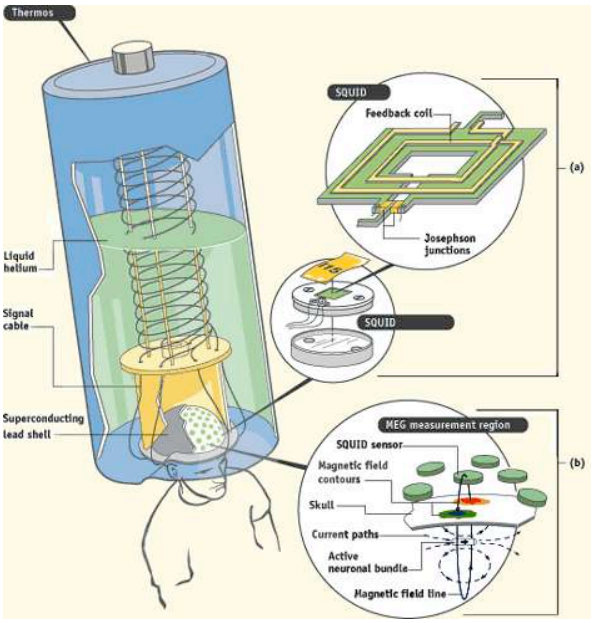


Figure 25 : a / Appareillage utilisé en TEP.
b/ Exemples de clichés obtenus par cette technique.

- La magnétoencéphalographie (MEG)

Cette technique mesure le champ magnétique produit par l'activité électrique du cerveau (figures 26a, 26b et 26c). Elle nécessite une extrême sensibilité et la suppression de toute autre source environnante, compte tenu de la faiblesse des champs magnétiques neuronaux.



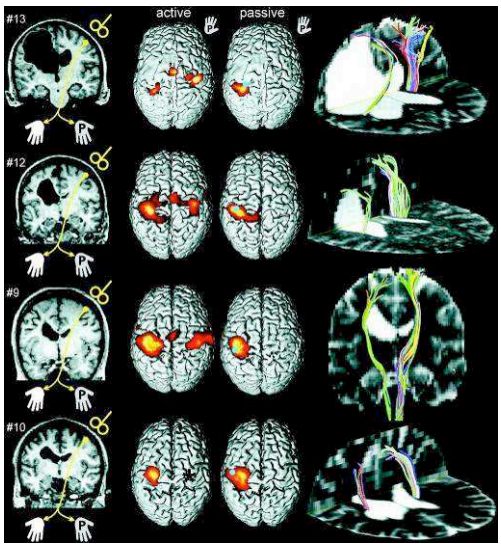


Figure 26 : a et b/ Appareillage utilisé en MEG et principe.
c/ Exemples de clichés obtenus par cette technique.

L'ensemble de ces méthodes, combinées à des processus de modélisation qualitatifs, physiologiques ou numériques, permettent une accélération constante de la compréhension du fonctionnement du cerveau. Elles nous permettent surtout de mieux comprendre la manière dont les sciences cognitives y accèdent, et ce qu'on est susceptible d'en attendre par rapport aux études didactiques.

3.4.2. Sciences cognitives et éducation

3.4.2.1. Une relation sérieuse et durable

Bien que jeune, cet ensemble de disciplines a atteint en quelques années un niveau de développement et de structuration de sa communauté et de sa communication, mais également un volume de productions et de publications équivalents à ceux des disciplines scientifiques traditionnelles. On ne

compte plus les revues scientifiques, les sociétés savantes et les réseaux de chercheurs, les structures, magazines et événements de communication publique organisés autour des sciences de la cognition.

Il n'est donc pas question ici pour nous de décrire l'état des recherches complètes menées dans le monde sur les différents aspects de la cognition. Notre objectif est bien davantage de cibler précisément ce qui, dans ces recherches, est susceptible d'être utile à la compréhension des processus d'apprentissage voire, si possible, aux questions éducatives en général. Or sur ce point, la compilation des résultats est nettement moins ardue car, en dépit des immenses progrès accomplis ces dernières décennies dans la compréhension du cerveau, très peu sont applicables à l'éducation. Cela, d'ailleurs, en dépit d'idées reçues particulièrement expansives, à la fois entretenues et combattues par la communauté scientifique, comme c'est le cas pour nombre de technologies et connaissances nouvelles qui nécessitent de susciter l'intérêt du public par la promesse des bénéfices à venir, mais qui voient ensuite naître des mythes populaires qui peuvent se retourner contre elles, comme on l'a observé récemment avec les nanotechnologies.

Avec les sciences cognitives, en matière d'éducation, on assiste à une transition équivalente à celle qu'a vécue la chimie dans les années 60-70 avec l'apparition des mécanismes réactionnels (Julia, 1963). Supplantant d'un coup la « chimie au lasso », approche phénoménologique des transformations de la matière ignorant la manière dont les réarrangements électroniques et atomiques se déroulaient, cette manière de voir a révolutionné la compréhension de la chimie, en même temps qu'elle l'a extrêmement complexifiée, conduisant à l'émergence de nouvelles techniques d'analyses extrêmement perfectionnées comme la spectroscopie femtoseconde ou la voltampérométrie cyclique, et à l'attribution de nombreux Prix Nobel (dont le dernier en date en France avec le mécanisme de la métathèse des oléfines d'Yves Chauvin). Il est en effet possible, aujourd'hui, de « voir le cerveau penser », comme il est devenu concevable à cette époque de voir la matière se transformer. Les techniques et les modèles n'en sont qu'à leurs balbutiements, mais on peut gager qu'ils nous réservent d'immenses découvertes dans les décennies à venir.

C'est pourquoi on observe une polarisation des attitudes de la communauté éducative à l'égard des sciences cognitives, entre scepticisme moqueur et attentes excessives, ce qu'Andler (2008) résume bien de la manière suivante : « *Si l'on pouvait [inspecter les pensées de tous ceux dont l'éducation est l'affaire et le métier, aux moments où ils se tournent vers les sciences cognitives], on distinguerait probablement deux attracteurs de force inégale. L'un serait l'idée que les sciences cognitives n'ont rien à apporter à l'éducation, l'autre qu'elles sont peut-être leur salut. Le premier, de loin le plus important, se diviserait en un pôle frivole : les sciences cognitives comme énième gadget moderniste, et un pôle sinistre : les sciences cognitives comme instrument de la rationalité techniciste, du positivisme, voire du capitalisme mondial. Le second, tout ténu qu'il soit, aurait aussi deux pôles, un pôle naturaliste : les sciences cognitives comme fondement de la méthode scientifique dans l'éducation, et un pôle artificialiste : les sciences cognitives comme déclinaison du paradigme informatique dans les classes* ». Quoi qu'il en soit, nous partageons son avis selon lequel la relation entre sciences cognitives et éducation est sérieuse et durable, et que les premières vont « *graduellement, mais plus rapidement qu'on ne l'imagine peut-être, s'inscrire au cœur de la pensée de [la seconde]* ». En guise d'illustration de ces rapports encore restreints mais prometteurs, les paragraphes suivants offrent un panorama de l'état actuel de ces découvertes consacrées ou applicables à l'éducation.

3.4.2.2. Une démarche particulière

D'une certaine manière, la démarche consistant à tirer parti des sciences cognitives pour l'éducation est inverse de celle des sciences de l'éducation elles-mêmes. Si ces dernières partent de l'école d'aujourd'hui et vont chercher dans d'autres secteurs (la psychologie, la sociologie, la didactique des disciplines...) des outils pour comprendre et améliorer les pratiques éducatives, cette démarche part nécessairement de recherches et de pratiques indépendantes et parfois très éloignées de l'école, pour tenter de les mettre

au service d'une réflexion sur l'école de demain. En ce sens, et au regard de la distinction que nous établissions plus haut, elle relève davantage d'un processus de cognition appliquée que de pédagogie théorisée, auxquelles s'apparentent plus souvent les théories éducatives (la théorie du changement conceptuel et le modèle allostérique relevant conjointement des deux approches).

C'est ce qui fait dire à Bruer (1993) que les sciences cognitives entretiennent avec l'éducation le même rapport que celui de la biologie avec la médecine, comme nous l'avons déjà évoqué au paragraphe *2.1.3.4. Théories éducatives et modèles d'enseignement*.

Explorer les sciences cognitives pour les appliquer à l'éducation n'est donc pas une simple affaire de bonne volonté : cela nécessite d'une part de connaître les sciences cognitives, et pas seulement un sujet restreint mais l'ensemble de leurs méthodes, approches et résultats validés, ce qui exige des compétences scientifiques variées et une grande culture du domaine, notamment pour savoir repérer les idées fausses qui circulent parfois en matière de « neuropédagogie » comme nous le verrons dans la section. *3.4.5. Les « neuromythes », ou ce que les sciences cognitives ne disent pas*. Mais d'autre part, cela demande également une bonne connaissance de l'école, car on ne saurait appliquer sans risques à une école les résultats bruts produits dans des laboratoires à partir de recherches sur les cerveaux d'individus isolés, nourrissons ou adultes, voire de patients malades ou cérébrolésés.

Cette tâche délicate a notamment été entreprise par le groupe COMPAS, à l'Ecole normale supérieure (Paris), sous la direction du Pr. Daniel Andler et auquel nous avons participé[27]. Les approches de ce type sont de moins en moins rares, mais sont difficiles à distinguer de la multitude d'informations produites sous couvert de scientificité cognitive ; un travail qu'il nous a fallu mener pour comprendre sur quelles bases théoriques réelles nous pouvions faire reposer notre propre réflexion en matière de cognition.

3.4.2.3. Niveaux de contribution et d'implications

Andler (2008) identifie plusieurs niveaux de contribution des sciences cognitives envers l'éducation :

- Des faits et des connaissances.
- Un langage et un style de raisonnement, voire un nouveau paradigme pour penser l'enseignement (Crombie, 1995 ; Hacking, 1983, Hacking, 1989).
- Une démarche et une méthodologie, qui peuvent inspirer des travaux, des expériences ainsi que des « *stratégies argumentatives et pratiques* ».

Larkin, citée par Andler (2008) parle ainsi d'une *vision of serendipity* qu'elle partage avec Bruer, consistant à parier que les sciences cognitives, dont l'objet premier n'est pas d'alimenter en découvertes le champ de l'éducation, sont susceptibles de leur apporter beaucoup (et réciproquement). Andler ajoute : « *Le pari est que ces apports seront le résultat de la configuration théorique [que les sciences cognitives] proposent, alors que le risque présent est de les juger uniquement sur leurs premiers résultats concrets qui sont (en matière d'éducation) de toute évidence encore non seulement modestes mais généralement méconnus* ». Mais Andler propose également qu'elles interviennent selon trois niveaux d'implication, qui sont autant de degrés d'explicitation de domaines de l'éducation par les sciences cognitives.

- Le niveau des « structures mentales ».

Compte tenu des héritages de la psychologie, et de Piaget en particulier, mais aussi du fort pouvoir évocateur en termes d'images, de représentations et d'impressions d'applicabilité directe que l'expression suscite, ce champ de connaissance n'est pas totalement inoffensif et, comme nous le verrons plus loin, peut dans certain cas alimenter davantage les mythes qu'initier des pratiques véritablement efficientes. A cet égard, les deux connaissances générales les plus importantes pour

[27] http://compas.risc.cnrs.fr - Dernière consultation le 05/02/2013.

l'éducation[28], apportées récemment par les techniques d'imagerie, résident sans doute dans :

1/ la plasticité du cerveau, qui reste «malléable», et donc susceptible d'adaptation, non seulement durant l'enfance mais tout au long de la vie, et

2/ l'impact de l'apprentissage sur le cerveau, qui y laisse des traces non seulement sous forme de signaux nerveux, mais également au niveau de sa structure même.

Mais les sciences cognitives défendent tout autant une hypothèse que l'on peut qualifier de *structurale*, qui accepte l'idée d'un déterminisme génétique sur la construction des structures cérébrales de l'humain. Une hypothèse non anodine si l'on comprend qu'elle suppose que :

1/ l'esprit de l'élève est le siège de structures relativement stables à chaque stade de son développement, ce qui milite pour une pédagogie tentant d'exploiter ces structures en favorisant les chemins mentaux « du moment » favorables à l'apprentissage, et que

2/ l'élève construit activement, au cours de ses expériences et apprentissages successifs, des structures cérébrales stables « non prévues dans la dotation initiale du petit humain » (Andler, 2008). Ce que confirme la *théorie du recyclage neuronal* de Stanislas Dehaene (Dehaene & Cohen, 2007), que nous évoquerons plus en détail ultérieurement. Et avec ces structures cérébrales construites, ce ne sont pas seulement des apprentissages fondamentaux qui s'opèrent, mais des savoirs spécialisés et des expertises qui se construisent, comme le confirment des travaux toujours plus nombreux dont l'occurrence se corrèle à l'affaiblissement de l'idée d'une compétence intellectuelle générale qui serait indépendante du domaine d'expertise (Bereiter & Scardamalia, 1993).

Il s'établit dès lors une dialectique délicate entre une certaine invariance de la structure mentale propre à l'espèce humaine, et cette idée de plasticité. Une question qu'Andler tranche en dépassant la querelle entre l'inné et l'acquis de la façon suivante : « *Ce que proposent les sciences cognitives, c'est une approche argumentée et susceptible de soutien empirique permettant d'articuler plasticité et invariance. Du même coup la querelle de l'inné et de l'acquis peut être surmontée sans difficulté, et s'y substitue une enquête bien plus intéressante non sur la « part » de chacun, mais sur le jeu entre dispositions initiales invariantes, évolution « balistique » (indépendante, sauf cas extrêmes, de l'environnement) et construction individuelle à partir de l'expérience* ».

- Le niveau méthodologique

Les sciences cognitives peuvent inspirer les recherches en sciences de l'éducation par le biais des méthodes et protocoles expérimentaux qu'elles ont développés. C'est ainsi que Dweck s'est intéressée aux conceptions que les élèves ont de l'intelligence, et l'impact de ces conceptions sur leurs propres marges de progrès. Elle distingue ainsi deux théories naïves de l'intelligence : l'une *fixiste* (l'intelligence est une donnée invariable propres à l'individu, comme la couleur des yeux) et l'autre *incrémentiste* (l'intelligence se travaille, se cultive et se développe). Mieux : elle prouve que les « élèves fixistes » tendent à s'effondrer lorsqu'ils rencontrent des difficultés sérieuses.

Compte tenu de la vision particulièrement fixiste de l'école, et de la possibilité de remédier facilement aux conceptions des élèves relatives à l'intelligence, il y a là matière à améliorer l'éducation à partir de résultats issus, non pas des sciences cognitives puisque Dweck est psychologue de l'éducation, mais d'une méthodologie scientifique qui leur est propre. Car ces résultats, qui auraient pu rester des truismes dans une approche traditionnelle de la motivation, prennent une ampleur nouvelle par la formulation d'une théorie précise et prédictive, validée non seulement par une analyse conceptuelle contradictoire mais par la validation statistique de résultats quantitatifs. C'est une telle approche que nous souhaitons justement mettre en pratique dans notre présente étude.

[28] Citées par l'étude du Technology Assessment Suisse : www.ta-swiss.ch/a/biot_hirn/2006_50A_KF_neuroimaging_f.pdf - Dernière consultation le 05/02/2013.

- Le niveau théorique

Nous aborderons plus loin la manière dont les sciences cognitives peuvent permettre de discréditer des théories éducatives infondées en produisant des résultats factuels ou théoriques robustes qui viennent les contredire. Elles peuvent également, bien entendu, produire des théories constructives et des guides pour la pratique. Ce sont ces divers exemples que nous étudierons dans la section *3.4.3. Apports théoriques* ; mais auparavant, aux trois niveaux d'Andler, nous souhaiterions en ajouter un nouveau : le niveau *clinique*.

- Le niveau clinique

Les neurosciences peuvent également contribuer à donner de nouvelles impulsions à la compréhension des causes des difficultés d'apprentissage tant chez les enfants que chez les adultes, voire à l'amélioration de la situation des personnes qui en souffrent. C'est ainsi qu'il est désormais possible de comprendre si un enfant présentant un problème de lecture souffre d'un retard de développement momentané ou de réels déficits (dyslexie par exemple).

De même, les sciences cognitives devraient permettre de détecter précocement, dès l'apparition de troubles d'apprentissage ou du comportement, des dysfonctionnements cérébraux permettant d'une part une prise en charge rapide de l'enfant et d'autre part la possibilité de mettre un nom sur ses troubles et d'éviter que lui, ses parents et ses professeurs ne le dévalorisent en le considérant comme un mauvais élève. Dans le cas extrême des troubles autistiques, une équipe londonienne a par exemple récemment fait la démonstration expérimentale de la possibilité de distinguer rapidement, par imagerie, les personnes présentant cette pathologie. La méthode, appliquée à vingt personnes souffrant d'autisme et à autant de sujets indemnes, a pu identifier avec une sensibilité de 90 % les sujets atteints. Selon ces auteurs[29], les motifs spatiaux détectés « *pourraient aider de plus amples explorations des soubassements génétiques et neuropathologiques spécifiques des troubles autistiques et fournir de nouveaux aperçus sur cette affection vraisemblablement d'étiologie multifactorielle* », mais aussi d'en effectuer des dépistages plus précoces.

Il va de soi que, même si les apports des sciences cognitives à l'éducation sont considérés comme maigres, il faudrait à tout le moins un ouvrage entier pour les décrire extensivement l'un après l'autre, sans oublier les sujets prometteurs ; nous ne nous y lancerons pas de manière exhaustive. Dans les deux sections suivantes, nous nous attacherons toutefois à décrire séparément deux types de contributions différentes. La première est d'ordre théorique et guidera *a priori* notre travail sur les processus d'apprentissage, grâce à plusieurs résultats originaux et concepts féconds. La seconde est d'ordre pratique et éclaire les difficultés pédagogiques qui peuvent être rencontrées dans des domaines spécifiques (lecture, arithmétique…) ou avec des types d'élèves particuliers (troubles de l'apprentissage ou du comportement). Nous nous contenterons parfois de les décrire brièvement. Dans le cours ultérieur de notre développement, nous réexaminerons au besoin certains de ces aspects en détail.

3.4.3. Apports théoriques

3.4.3.1. Les théories naïves

Parce que certains domaines sont d'une importance particulière pour les humains, l'évolution semble les avoir conduits à l'élaboration de « théories » innées, dites « naïves » et considérées comme des corps solidaires de croyances tacites articulées par des règles cohérentes, leur permettant de faire face aux situations courantes. Ces connaissances, opératoires dans la plupart des cas, sont en général également correctes d'un point de vue scientifique (un objet « tombe » vers le sol lorsqu'on le lâche).

[29] Cités par *Le Monde*, Dépistage expérimental de l'autisme, édition du 14 août 2010.

Mais il arrive fréquemment qu'elles leurs soient contraires (les objets lourds tombent plus vite que les objets légers, en contradiction avec les lois de Newton dans le vide ; il faut fournir de l'énergie à un véhicule pour entretenir son mouvement, en contradiction avec le principe d'inertie, etc.).

On parle ainsi de « physique naïve », d'arithmétique naïve (qui permet le dénombrement de petites quantités), de psychologie naïve (que l'on nomme également « théorie de l'esprit » et qui permet d'attribuer des représentations, des croyances et des intentions à autrui), voire de biologie ou de sociologie naïves… Autant de croyances qui à la fois servent de socles aux apprentissages ultérieurs (un aspect que nous ré-évoquerons dans la construction du modèle allostérique) et peuvent constituer des obstacles à la progression scolaire des enfants. Bien plus que de déconstruire des connaissances mal élaborées, il s'agit ici d'aller contre une connaissance « naturelle », acquise par des millénaires d'évolution. Autant dire que la conscience de l'existence de ces théories naïves est fondamentale pour l'enseignant.

Quatre exemples sont particulièrement représentatifs de l'intérêt qu'elles représentent. Le premier est issu des travaux de Spelke *et al.* (1995). Dans l'expérience représentée à la figure 27, conçue par Moore *et al.* (1978) mais modifiée pour être adaptée à des enfants, les barres noires représentent des caches, derrière lesquels se déplacent les barreaux blancs, depuis la position marquée en traits pleins jusqu'à la position grise marquée par les pointillés :

a) Evénement continu

b) Evénement discontinu

c) Déplacement d'un objet unique

d) Déplacement simultané de deux objets

On présente alors à des bébés de 4 mois les 4 séquences décrites dans la première colonne de la figure ci-dessous.

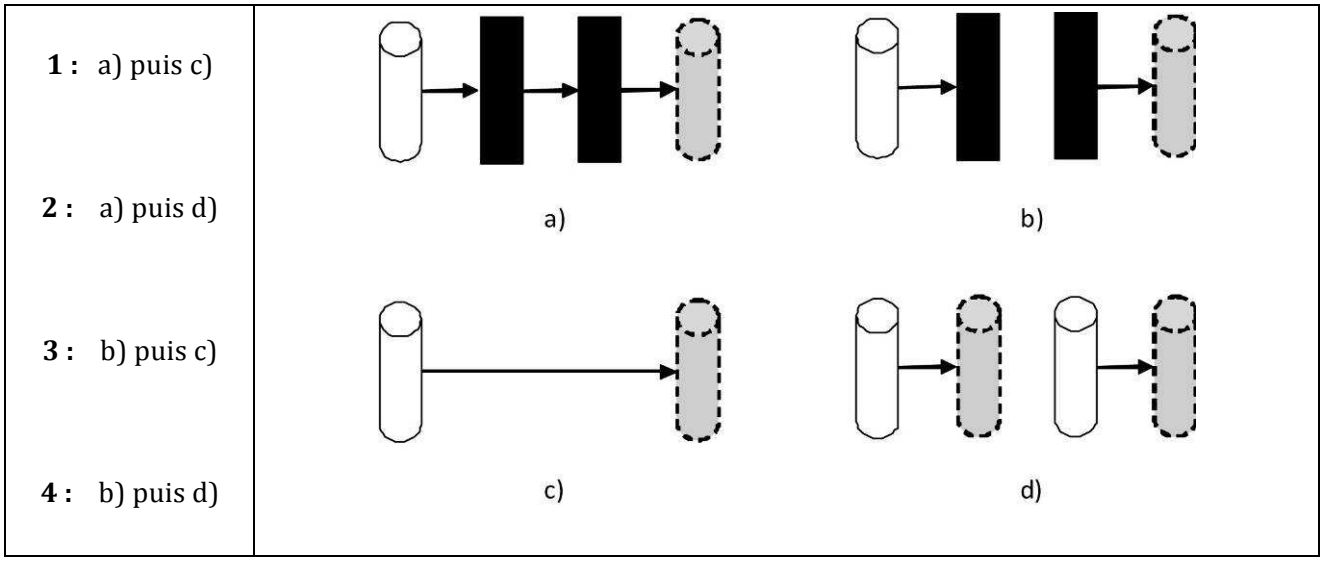


Figure 27 : Mise en évidence d'une connaissance naïve en matière de continuité spatio-temporelle.

Par la mesure de l'attention accordée par les bébés à ces événements successifs, on détermine par un test de succion ceux qui les étonnent et ceux qui les ennuient. Les résultats sont étonnamment cohérents : les bébés sont globalement intéressés par la seconde situation, mais seulement dans les séquences 2 et 3. Spelke prouve ainsi l'existence d'un principe cognitif quasi-inné : la continuité spatio-temporelle. En effet, si cette compétence est présente chez l'enfant, alors il conçoit spontanément la présence d'un objet unique dans le cas a) et de deux objets dans le cas b). La présentation subséquente d'un événement qui corrobore son hypothèse provoque alors chez lui moins d'étonnement que la présentation d'un événement qui l'infirme.

A l'aide d'expériences similaires, plusieurs recherches ont montré l'existence d'autres principes chez des enfants du même âge, tels que celui de numérosité. Ainsi le second exemple, rapporté par Andler (2008), concerne un type particulier de « pré-équipement » cognitif renforçant l'idée d'arithmétique naïve (Gilmore, McCarthy & Spelke, 2007). Selon ces travaux, les très jeunes enfants ayant acquis le vocabulaire de la numération seraient munis d'un système de représentation non symbolique des nombres entiers grâce auquel il leur serait possible de fournir rapidement le résultat approximatif d'opérations simples. Et Andler de déplorer : « *Or, de cette aptitude ou compétence, on ne tient aucun compte dans l'enseignement. Au contraire, il est proscrit de se faire une idée approximative du résultat (l'enseignement des ordres de grandeur n'intervient que beaucoup plus tard, ne concerne que des nombres relativement grands et qui ne sont pas, sauf cas particulier, des entiers)* ». C'est ce que laissait présager l'étude de Karen Wynn (1992) qui, selon un protocole semblable au précédent représenté sur la figure 28, avait montré que des bébés de 4-5 mois étaient capables de calculer le résultat d'opérations arithmétiques simples (addition et soustraction).

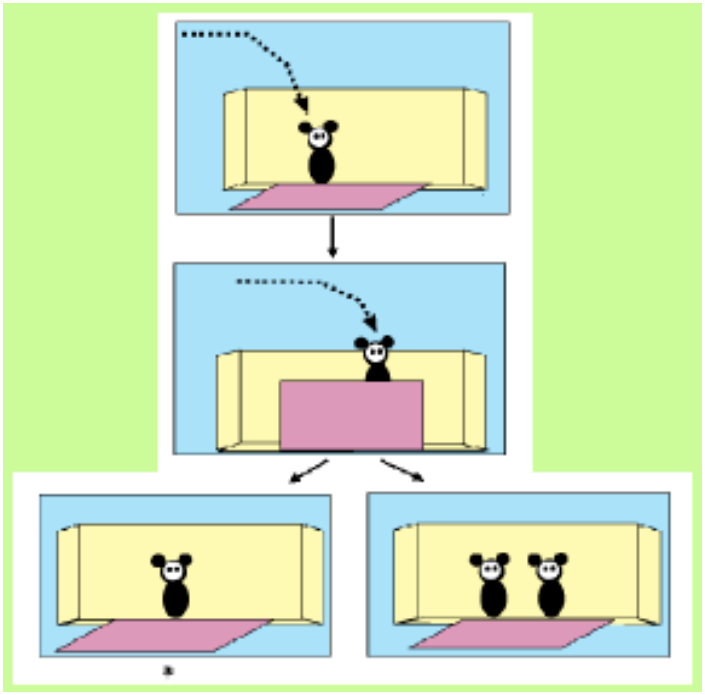


Figure 28 : Un Mickey disparaît derrière un cache, puis un second. Le cache tombe et deux situations se présentent : 1/ un seul ou 2/ deux Mickey apparaissent à l'endroit où on les avait placés.

Ces résultats ne se limitent pas aux nourrissons. Notre troisième exemple est une recherche d'anthropologie cognitive publiée par Pica *et al.* (2004) et menée sur les *Mundurucus*, peuple d'Amazonie brésilienne ne possédant ni objets ni concepts leur permettant de caractériser les formes géométriques les plus simples, ni termes permettant de nommer les chiffres au-delà de cinq. Prouvant tout de même leur aptitude à discriminer visuellement des figures aux géométries particulières, Pica et ses collaborateurs ont ainsi alimenté l'hypothèse selon laquelle la variation culturelle des performances mathématiques et géométriques n'empêche pas l'existence d'un « noyau de compétences communes » (Journet, 2006).

De même en linguistique, enfin, la variété des langues se ramène, selon l'école chomskienne (Chomsky, 2000 ; Dehaene, 2003), à un petit nombre de règles et de propriétés syntaxiques universelles liées à une compétence commune. Au-delà de la diversité des langues, il existerait une grammaire universelle, laquelle renverrait à une compétence langagière préexistant à l'apprentissage.

3.4.3.2. Les concepts

La tradition philosophique, d'Aristote à Kant, accorde une large place à l'étude des concepts ; ce n'est pourtant que depuis une trentaine d'années qu'une approche empirique leur a été dédiée, notamment par les sciences cognitives. Andler (2008) écrit ainsi : « *Aujourd'hui, les sciences cognitives ont une vision relativement stable […] des différentes manières dont les concepts sont représentés dans l'esprit, et de là peuvent formuler des hypothèses sur [leur] acquisition, sur l'existence de protoconcepts […] innés, sur le déploiement des concepts à des fins de catégorisation. Parmi les nombreuses applications au domaine de l'éducation que l'on peut envisager, c'est le changement conceptuel qui a suscité les travaux les plus prometteurs* ».

La théorie du changement conceptuel et le modèle allostérique feraient-ils partie des sciences cognitives ? Nous l'avons vu, ces dernières se définissent avant tout par leur objet et entendent fédérer, avec le vocabulaire de la psychologie cognitive, l'ensemble des disciplines qui étudient individuellement une composante de l'esprit humain. A cet égard, il n'est pas étonnant que ceux qui, comme Andler, conçoivent le champ d'investigation des études cognitives comme très étendu, y incluent des approches qui ont pu être développées sans s'en revendiquer. A notre sens, peu importe, tant que les recherches sont conduites dans la perspective de comprendre, à l'aide de tous les moyens possible (y compris l'interaction avec d'autres disciplines), plutôt que de défendre des territoires. C'est là tout l'intérêt de notre propre étude, qui s'ancre, par cette citation d'Andler, dans la double tradition des sciences de l'éducation et des sciences cognitives.

Du point de vue des sciences cognitives, toutefois, la théorie du changement conceptuel présente deux différences avec la manière dont la voient les sciences de l'éducation. En premier lieu, elle semble davantage vue comme la transformation de concepts innés ou acquis très précocement par l'enfant (comme nous l'avons évoqué ci-dessus), plutôt que comme celle de concepts acquis (ou mal acquis) durant l'éducation et faisant obstacle à de nouvelles acquisitions. Là encore, peu importe, la question résidant davantage dans les mécanismes de la transformation (graduelle, par modification et enrichissement ou au contraire de nature « révolutionnaire », au sens de Kuhn) que dans celle de la nature, innée ou acquise, des concepts transformés (et bien que la question de savoir s'il est plus aisé pour l'individu de transformer des concepts innés ou acquis mérite d'être posée). En second lieu, ces questions sont traduites par les sciences cognitives en problèmes plus proches de l'acquisition de compétences de base et des théories naïves que des apprentissages complexes qui intéressent les sciences de l'éducation en général : « *L'enfant de 6 ou de 12 mois, de 5 ou de 8 ans, possède-t-il un concept de nombre ? Un concept de somme ? Un concept d'essence biologique ou d'espèce ? Un concept de mouvement inertiel ? De conservation de l'énergie ? Et ainsi de suite...* » (Andler, 2008).

3.4.3.3. Cerveau, aires cérébrales et cartes corticales

Quiconque a suivi un cours de biologie de niveau lycée connaît le rôle du cerveau, sa structure majoritairement corticale et la nature des cellules qui transmettent l'influx nerveux, les neurones, connectés par des synapses chargées d'assurer biochimiquement le relais de l'information. La différence entre substance blanche et matière grise est moins connue, mais d'importance secondaire. Quant à la question de la localisation de certaines compétences dans des parties spécifiques du cerveau, elle tend à faire partie de la culture générale de l'honnête homme du 21e siècle. Dans le dictionnaire *Dixel* des éditions *Robert* (Eastes, 2009), nous donnions du cerveau la définition suivante (extrait), sorte de mémento minimum de ce qu'il faudrait raisonnablement savoir sur le sujet.

> Le cerveau supervise le système nerveux et contrôle l'essentiel des activités de l'organisme : perception, motricité, apprentissage, mémoire, émotions, langage, attention, homéostasie, production hormonale… Il est composé de deux hémisphères, chacun exerçant un contrôle sur la moitié opposée du corps.

Les fonctions cognitives sont quant à elles distribuées de façon partiellement dissymétrique : le langage est ainsi traité de manière prédominante par l'hémisphère gauche chez les droitiers. Le cerveau est en effet organisé selon une architecture fonctionnelle précise, chaque zone ayant la responsabilité d'une ou de plusieurs activités : fonctions motrices dans le lobe frontal, vision dans la partie postérieure du lobe occipital, perception de l'espace dans le lobe pariétal, reconnaissance des visages dans le lobe temporal…

La plupart des fonctions cognitives complexes mettent toutefois en œuvre la collaboration de plusieurs aires cérébrales, situées dans les deux hémisphères. L'opposition entre cerveau gauche (logique et rationnel) et cerveau droit (émotionnel, intuitif et créatif) est donc caricaturale, surtout lorsqu'elle est évoquée pour justifier des différences d'ordre sexiste.

La matière grise est constituée du corps cellulaire des neurones (une centaine de milliards chez l'humain). Elle se situe principalement à la surface du cerveau (le cortex), qui se replie en de multiples circonvolutions. Les informations y sont reçues, traitées et intégrées. La substance blanche est composée de fibres nerveuses, les axones des neurones, qui relient les différentes parties du cerveau et transmettent les impulsions nerveuses entre les neurones et les capteurs extérieurs.

Toutefois, la manière dont l'information est stockée et traitée par cet organe reste largement inconnue du grand public (et donc des enseignants), la vision la plus naïve consistant à lui transposer le principe de l'ordinateur. Le point important de la définition précédente concerne la collaboration entre les aires cérébrales, et ce pour deux raisons : d'abord, cela a été dit, les fonctions cognitives sont rarement traitées par une zone unique ; ensuite, la notion d'aire cérébrale est souvent confondue avec celle de lobe ou d'étage cérébral (beaucoup plus étendus), et il suffit d'avoir l'opportunité d'observer une image du cerveau en IRM pour se rendre compte de la localisation extrême de certaines aires (figure 29 ; Goswami, 2006). Dès lors, tout enseignant souhaitant commencer à s'intéresser aux études cognitives sera bien avisé d'étudier ces quelques caractéristiques fondamentales pour éviter de comprendre leurs résultats à travers des conceptions fausses qui risqueront de les déformer.

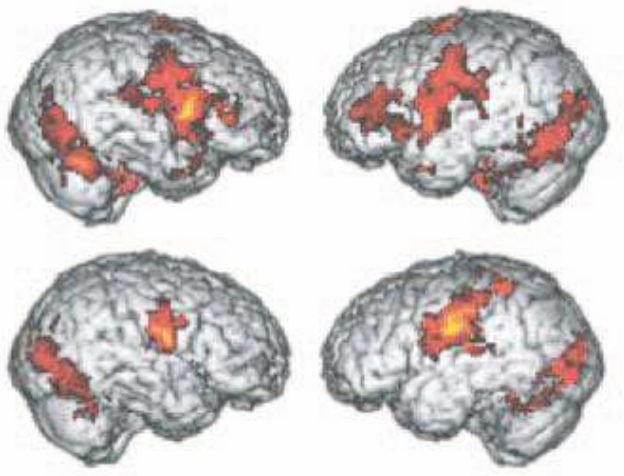


Figure 29 : Comparaison de l'activité cérébrale lors de l'imitation et de l'observation d'expressions émotionnellement marquées chez des enfants au développement normal (haut) et des enfants présentant des troubles autistiques (bas).

Pour en revenir au traitement de l'information et de l'action, plus que les aires cérébrales, ce sont ce que Dehaene nomme « cartes corticales » (Dehaene & Cohen, 2007) qui méritent l'attention. Ce concept repose comme nous l'avons vu sur l'observation d'activations simultanées et reproductibles

d'aires cérébrales coordonnées lors de la réalisation d'une fonction cognitive (ce qui en soi n'est pas évident *a priori*), et suppose en outre qu'il soit possible de représenter les structures mentales sur la surface du cortex. Dans les cas simples, cette condition est réalisée ; dans les cas où la structure est multidimensionnelle, il est possible de la paramétrer de manière à ce que les colonnes corticales puissent être projetées sur une surface bidimensionnelle. Dehaene *et al.* (2005) ont ainsi pu mettre en évidence la localisation corticale d'objets culturels tels que les lettres de l'alphabet.

Pour rendre cet outil utile dans la compréhension des mécanismes cérébraux, il est intéressant de l'appréhender à différentes échelles :

- Les *macromaps*

Ces cartes décrivent l'organisation géométrique des aires cérébrales. A cette échelle, de l'ordre de plusieurs centimètres, des études en TEP ou en IRMf ont pu montrer des liens entre l'activation de certaines aires par des mots écrits et celle d'aires proches répondant à des visages ou des objets (Puce *et al.*, 1996 ; Gaillard *et al.,* 2006).

- Les *mésomaps*

Ces cartes caractérisent cette fois la structure cérébrale spatiale à l'intérieur d'une aire donnée, à l'échelle de plusieurs millimètres. Elles permettent de coder spatialement des paramètres spécifiques (tonalité musicale, localisation visuelle) sur l'ensemble de la surface de l'aire concernée. Elles s'observent en IRMf à haut champ.

- Les *micromaps*

A un niveau encore plus fin, ces structures encodent des informations telles que l'orientation d'une ligne à l'échelle d'une colonne corticale unique (quelques centaines de microns). Dehaene & Cohen restent toutefois prudents sur l'intervention systématique de ces microstructures colonnaires, leur caractérisation expérimentale restant pour le moment délicate et toujours indirecte. Toutefois, dans son cours au Collège de France (2008)[30], Dehaene évoque les études sur les singes de Nieder & Miller, au MIT, leur ayant permis de découvrir l'existence de populations de neurones dont le taux de décharge varie avec le nombre d'objets présentés. Certains neurones sont activés préférentiellement par un objet unique, d'autres par deux, par trois, par quatre ou par cinq objets (Nieder, 2005), et même jusqu'à une trentaine d'objets (Nieder & Merten, 2007). Des « neurones des nombres » propres à renforcer l'hypothèse des *micromaps*.

La question fondamentale liée à ces travaux concerne l'origine de ces cartes corticales. Selon Dehaene & Cohen, la différenciation corticale permettant la reproductibilité des cartes culturelles telles que celles de la lecture ou de l'arithmétique (voir plus loin) proviendraient d'une part de l'expression génétique (cartes morphogénétiques pour les *macromaps* au moins), comme c'est le cas de la différenciation entre les aires liées à la vision, à l'audition et au toucher (Krubitzer & Kahn, 2003). Elles proviendraient d'autre part de l'activité postnatale conduisant à un remodelage fin de ces biais génétiques, conduisant à des meso- et micromaps épigénétiques (Gilbert *et al.*, 2001).

Si nous avons pris la peine d'évoquer ce concept de cartes corticales encore flou et incertain, bien que Dehaene & Cohen en donnent des validations expérimentales convaincantes, c'est parce qu'il nous semble constituer pour le moment le meilleur support théorique auquel relier la notion de *conception* propre à la théorie du changement conceptuel et au modèle allostérique. Surtout lorsqu'on le relie à la théorie du recyclage neuronal du même auteur.

[30] www.college-de-france.fr/media/stanislas-dehaene/UPL22033_dehaene_res0708.pdf - Dernière consultation le 05/02/2013.

3.4.3.4. Le recyclage neuronal

- Invariance et plasticité cérébrales

Dans un article récent (Dehaene & Cohen, 2007), intitulé *Cultural recycling of cortical maps*, Dehaene et Cohen développent en détail l'hypothèse selon laquelle un certain nombre d'apprentissages, entrés trop récemment dans la culture humaine, doivent s'encoder sur des structures cérébrales natives adaptées à d'autres tâches plus anciennes. Ils proposent notamment un modèle théorique d'interaction entre les compétences acquises culturellement et la structure corticale.

L'article commence notamment par les phrases suivantes : « *Part of human cortex is specialized for cultural domains such as reading and arithmetic, whose invention is too recent to have influenced the evolution of our species. Representations of letter strings and of numbers occupy reproducible locations within large-scale macromaps, respectively in the left occipito-temporal and bilateral intraparietal cortex. Furthermore, recent fMRI studies reveal a systematic architecture within these areas. To explain this paradoxical cerebral invariance of cultural maps, we propose a neuronal recycling hypothesis, according to which cultural inventions invade evolutionarily older brain circuits and inherit many of their structural constraints* ». Cette dernière partie de phrase est aussi exaltante que féconde ; elle est en effet susceptible d'offrir des perspectives abyssales aux pédagogues car elle signifie que nos apprentissages fondamentaux (lecture, écriture, calcul, etc.) seraient influencés à notre insu par des compétences primitives, mais de toute autre nature.

L'hypothèse n'est pas anodine et semble aller à contre-courant du paradigme dominant bâti sur la découverte de la plasticité cérébrale. Selon cette vision, qui n'est pas sans rappeler le modèle empiriste décrit dans la partie précédente (à la section *2.2.2. La tradition empiriste*), la capacité du cerveau d'absorber l'énorme quantité d'informations culturelles dont l'humain moderne est instruit tout au long de sa vie serait essentiellement liée à cette plasticité (Barkow *et al.*, 1992 ; Pinker, 1994 ; Pinker, 2002) et à l'existence de larges aires cérébrales non-spécialisées (Quartz & Sejnowski, 1997) ; en d'autres termes, il y aurait dans le cerveau de l'humain « de la place pour apprendre ». En effet, comme le rappelle Dehaene (2007) : « *Only humans experience a massive expansion of their evolutionary niche through cultural invention and transmission. By definition, cultural objects such as tools or writing systems are recent, optional, and acquired by learning. No selective pressure could have shaped the human brain to facilitate reading or high-level mathematics* ». Il en donne pourtant une autre interprétation : notre capacité à acquérir des compétences culturelles telles que l'écriture ou l'arithmétique serait fortement contrainte par notre évolution antérieure et par l'organisation cérébrale (« *We argue that the major domains of human cultural variability —including writing and arithmetic— are tightly constrained by our prior evolution and brain organization. In all cultures, these domains of knowledge map onto remarkably invariant brain structures that may aptly be called ''cultural maps,'' with only small cross-cultural variations* »). La plasticité n'est pas niée pour autant : elle s'applique simplement dans une moindre mesure, exploitant les capacités de structures mentales primitives, et donc préexistantes.

- L'idée de non-apprenabilité

L'idée peut sembler saugrenue à première vue : comment la faculté de lecture pourrait-elle s'ancrer dans des aires dédiées à la reconnaissance des visages, ou les compétences arithmétiques dériver de nos représentations spatiales ? La réponse est de deux ordres : pour ce qui est des objets purement culturels comme le langage, il suffit de réaliser qu'ils ont été créés par des humains eux-mêmes, à partir d'aires cérébrales qui en étaient capables ; les mêmes aires qui permettent aux nouveaux humains d'acquérir ces langages. C'est ce qui laisse penser (et certaines études le confirment) qu'un langage conçu totalement artificiellement pourrait s'avérer « non-apprenable ». Une idée également confirmée par l'observation de structures syntaxiques communes entre les langues humaines et les créoles, même lorsque ces derniers apparaissent naturellement (à partir de pidgins créés par des

communautés d'adultes de langues maternelles différentes pour communiquer entre eux, par exemple). Des structures syntaxiques qui ne proviennent pas de l'environnement, mais des enfants eux-mêmes, qui enrichissent peu à peu le pidgin de départ (Christophe, 2008). Pour ce qui est des compétences logiques comme l'arithmétique, en revanche, la question est un peu plus complexe, mais nous verrons plus loin que le lien entre l'espace et les nombres est plus resserré qu'il n'y paraît à première vue, et que cette réaffectation neuronale est relativement naturelle (ce qui peut être mis en relation avec les compétences arithmétiques des nourrissons évoquées plus haut).

Selon Sperber (2004), enfin, il est possible que d'autres compétences culturelles (telles que la musique, l'art, la religion) puissent être interprétées à l'aide de la théorie du recyclage neuronal, bien que personne ne soit pour le moment capable d'identifier les modules cérébraux impliqués.

- <u>De l'exaptation au recyclage neuronal</u>

Le modèle de Dehaene et Cohen s'inspire du concept d'*exaptation*, issu du vocabulaire de la théorie de l'évolution (Gould & Verba, 1982) et désignant la réutilisation, dans le cours de l'évolution, d'un ancien mécanisme biologique dans un rôle totalement différent. Dehaene lui préfère toutefois l'idée de « recyclage neuronal » (2005) « *to refer to the putative mechanism by which a novel cultural object encroaches onto a pre-existing brain system* ». Il se fonde sur trois postulats :

1. L'organisation du cerveau humain est très contrainte par l'évolution sur les plans anatomique et connexionnel. Des cartes neuronales sont présentes chez le petit enfant, qui perturbent les apprentissages ultérieurs.
2. Les acquisitions culturelles telles que la lecture doivent trouver leur « niche neuronale », un système de circuits suffisamment proches de la fonction requise et suffisamment plastiques pour pouvoir exploiter une fraction significative de leurs ressources à la nouvelle fonction.
3. Lorsque les territoires corticaux dédiés aux anciennes fonctions sont envahis par de nouveaux objets culturels, leur organisation initiale n'est jamais totalement effacée ; par suite, des contraintes neuronales fortes s'exercent sur l'acquisition et l'organisation des savoirs à tous les âges.

- <u>Conséquences pédagogiques</u>

En dépit du petit nombre et de la simplicité de ces idées, les conséquences sont aussi nombreuses que prolifiques, et s'expriment aussi bien en termes de variabilité culturelle que de compétition entre anciennes et nouvelles compétences ; ainsi, une perte de la perception de la symétrie (compétences primitive fondamentale pour la reconnaissance des visages) semble accompagner l'automatisation de la reconnaissance des lettres et des mots lors de l'apprentissage de la lecture (Lachmann & van Leeuwen, 2007). Dans d'autres cas bien sûr, les compétences cérébrales peuvent être synergiques : la faculté de lecture améliore par exemple la mémoire verbale et l'attention phonémique (Morais & Kolinsky, 2005).

Mais la conséquence la plus étonnante pour l'éducation s'exprime en termes de répercussions sur les vitesses d'apprentissage. Selon Dehaene & Cohen (2007) : « *The speed and ease of cultural acquisition in children should be predictable based on the complexity of the cortical remapping required* ». En d'autres termes, la distance entre le précurseur évolutif et la nouvelle fonction devrait avoir une influence sur la facilité d'apprentissage, tout comme la complexité computationnelle intrinsèque de ladite fonction. Ainsi, les contraintes corticales initiales devraient permettre d'expliquer à la fois la facilité avec laquelle les enfants acquièrent certains outils culturels, et les difficultés spécifiques qu'ils vont rencontrer. Un exemple particulièrement frappant concerne la difficulté pour les enfants de reconnaître les lettres p et q en minuscules. Une difficulté qu'il est possible de relier à la propension native de notre système de reconnaissance visuelle à ne pas discriminer entre les images miroir de

deux objets, compte tenu de la faible pertinence de cette compétence dans le monde naturel (Dehaene *et al.,* 2005 ; Rollenhagen & Olson, 2000). Plus récemment, dans son cours du Collège de France[31], Dehaene précisait, à propos de l'aire de la forme visuelle des mots (sillon occipito-temporal latéral gauche) et suite à une nouvelle étude en IRMf dans son laboratoire : « *[Il n'est] peut-être pas étonnant que les enfants confondent initialement les lettres et leurs images en miroir : pour des raisons que nous ne comprenons encore qu'imparfaitement, l'apprentissage de la lecture recycle une aire cérébrale qui est précisément celle qui présente, au départ, l'invariance en miroir la plus forte* ».

Mieux, l'augmentation des réponses aux mots pourrait s'accompagner de diminutions des réponses à d'autres catégories de connaissances. Chez les analphabètes, les résultats de Dehaene *et al.* (2010) confirment que l'aire visuelle de l'hémisphère gauche qui, chez les lecteurs, décode les mots écrits, répond à une fonction proche : la reconnaissance visuelle des objets et des visages. Dans cette région, au cours de l'apprentissage, la réponse aux visages diminue légèrement à mesure que la compétence de lecture augmente, et l'activation aux visages se déplace partiellement dans l'hémisphère droit. Le cortex visuel se réorganise donc, en partie, du fait de la compétition entre l'activité nouvelle de lecture et les activités plus anciennes de reconnaissance des visages et des objets. Chez l'enfant de quatre ans, Dehaene et Cantlon sont également parvenus à confirmer l'existence d'une compétition entre l'apprentissage des lettres et des visages : l'amélioration des scores de reconnaissance des lettres s'accompagne d'une diminution systématique de l'activité évoquée par les visages dans la région fusiforme (Cantlon *et al.,* 2011). Les compétences primitives ne freinent donc pas seulement les apprentissages nouveaux : il arrivent que ce soient les apprentissages eux-mêmes qui agissent sur les compétences primitives en en réduisant la portée.

Cette théorie n'est pas qu'une hypothèse ou une vue de l'esprit : dans leur article de 2007, Dehaene et Cohen montrent l'existence de cartes culturelles relativement invariables, identifiables à l'aide de méthodes d'imagerie, alors que dans son ouvrage *Les neurones de la lecture* (2007), Dehaene expose et discute en détail les autres implications du recyclage neuronal. Une toute dernière question se pose toutefois : dans la mesure où les primates non-humains partagent avec nous certaines compétences culturelles (Withen *et al.,* 1999), comment se fait-il que nous soyons la seule espèce à avoir développé une culture élaborée ? Plusieurs hypothèses permettent d'y répondre, telles une période prolongée de croissance cérébrale et de plasticité (Coqueugniot *et al.,* 2004), ou l'existence d'un « espace de travail neuronal global » (Dehaene & Naccache, 2001). Mais la plus intéressante est l'idée que l'humain disposerait d'une compétence spécifique en termes de transmission culturelle et de pédagogie, peut-être liée à un talent particulier à se représenter ce que les autres savent (Tomasello, 2000). De quoi introduire une autre contribution des sciences cognitives à l'éducation : l'idée de *protopédagogie*, que nous aborderons dans le paragraphe *3.4.4.4. Protopédagogie et épistémologie naïve*.

Quoi qu'il en soit et au préalable, force est de constater que cette approche semble englober, ou du moins relier, nombre d'autres éléments de compréhension des structures de pensée et des mécanismes d'apprentissage. Elle ne semble pas, par ailleurs, pouvoir être négligée dans une approche constructiviste de l'apprendre. Nous la réemploierons donc plus tard, lors de la construction du modèle allostérique formalisé. En ce sens, elle constitue une partie fondamentale de notre cadre théorique.

3.4.3.5. Les chemins de pensée et le modèle-cadre SRK

Deux éléments théoriques nous conduisent à accorder la plus grande importance à cette question, et donc à nous intéresser à la manière dont elle est traitée par les sciences cognitives. Le premier est la notion de *p-prims* particulières (diSessa, 1993), déjà évoquée plus haut, induisant l'idée que le recours à une conception donnée (conceptions que diSessa nomme également *p-prims*) est régie par des règles que l'apprenant doit construire pour pouvoir activer ladite conception à bon escient. A plusieurs

[31] www.college-de-france.fr/media/stanislas-dehaene/upl62003_dehaene.pdf - Dernière consultation le 05/02/2013.

reprises dans le texte qui précède, nous avons déjà souligné la nécessité d'accompagner la prise en compte de ces règles d'activation par une attention portée à leur inhibition.

Le second, également déjà évoqué, se rattache au cadre des sciences cognitives bien qu'il concerne les travaux d'un psychologue et économiste : Daniel Kahneman. Dans une série d'articles publiés à partir de 1971 avec Amos Tversky sur la prise de décision, qui culmine avec la publication de leur *théorie des perspectives* en 1979 (Kahneman & Tversky, 1979), il jeta les bases d'une théorie de l'économie comportementale qui allait lui valoir le prix de la Banque de Suède en sciences économiques en mémoire d'Alfred Nobel (appelé couramment et abusivement prix Nobel d'économie), dont le texte de la conférence a été publié (Kahneman, 2002).

- Heuristiques et biais cognitifs

Dans l'un de leurs articles les plus célèbres (*Le jugement dans l'incertitude : heuristiques et biais* ; Tversky & Kahneman, 1974), les deux auteurs introduisent la notion d'*heuristique*, qui nous sera extrêmement utile dans le développement de notre théorie allostérique. Sans vraiment définir cette notion (qui, comme bien d'autres, a de multiples sens dans la littérature), l'introduction de cet article *princeps* donne une idée relativement précise de l'emploi qu'ils en feront ensuite (et qui sera encore précisé dans Kahneman & Frederick, 2002) : « *Many decisions are based on beliefs concerning the likelihood of uncertain events such as the outcome of an election, the guilt of a defendant, or the future value of the dollar. These beliefs are usually expressed in statements such as "I think that…", "chances are...", "it is unlikely that...", and so forth. Occasionally, beliefs concerning uncertain events are expressed in numerical form as odds or subjective probabilities. What determines such beliefs? How do people assess the probability of an uncertain event or the value of an uncertain quantity? This article shows that people rely on a limited number of heuristic principles which reduce the complex tasks of assessing probabilities and predicting values to simpler judgmental operations. In general, these heuristics are quite useful, but sometimes they lead to severe and systematic errors* ».

La notion d'heuristique ne doit donc pas ici être perçue dans son sens le plus courant (l'art d'inventer, de faire des découvertes ou plus généralement la désignation des démarches et outils intellectuels favorisant la découverte ou l'invention dans les sciences) ou dans le sens que Polya lui donne en mathématiques (« *Ce qui met sur la voie* », 1954), mais plutôt comme le déclenchement d'un raisonnement simple, d'un mécanisme cérébral spontané conduisant à un résultat rapide face à un problème donné. En ce sens, sa signification se rapproche davantage de celle qu'elle revêt en informatique et en intelligence artificielle, où l'heuristique désigne « *une méthode de résolution de problèmes non fondée sur un modèle formel et qui n'aboutit pas nécessairement à une solution optimale* » (source : Wikipedia 2013).

L'exemple typique est celui des échecs : les blancs disposent à chaque coup, en théorie, d'une stratégie gagnante : il « suffit » de parcourir l'arborescence de tous les coups possibles et de choisir à chaque nœud le chemin qui se termine par la victoire. Une stratégie évidemment hors d'atteinte, pour des raisons d'explosion combinatoire. Le joueur doit donc se régler sur une fonction d'évaluation (distance « directe » par rapport au gain, ou indice instantané de rapport de force), l'*heuristique* consistant à faire à chaque coup le mouvement qui maximise cette fonction.

Appliquée aux processus cognitifs, cette conception est intéressante en ce sens qu'elle sous-entend que, pour diverses raisons, il n'est pas toujours possible de saisir l'ensemble des implications d'une stratégie intellectuelle et qu'il est possible que, comme aux échecs, le choix d'une stratégie apparemment gagnante se révèle inféconde. Or c'est exactement ce que décrivent Tversky et Kahneman.

En l'occurrence, ils identifient trois heuristiques classiques et généralement efficaces mais qui, lorsqu'elles sont utilisées pour évaluer des probabilité et prévoir des valeurs, comportent divers biais qui conduisent eux-mêmes à des erreurs de jugement prévisibles : la *représentativité*, la *disponibilité* et l'*ajustement* (associé dans l'article à l'*ancrage*).

- La première (l'heuristique de *représentativité*) consiste à associer deux objets, événements ou processus en fonction d'une intuition issue de leur parenté habituelle ou plausible. On y retrouve notamment l'idée du *stéréotype* : si Steve est timide, serviable, solitaire et ordonné, une majorité de personnes sondées considèrent qu'il a plus de chances d'être libraire qu'agriculteur en dépit du fait qu'ils ne savent rien d'autre de Steve et (premier biais) qu'il y ait plus d'agriculteur que de libraires dans la population (deuxième biais).
- La seconde (l'heuristique de *disponibilité*) consiste à évaluer la probabilité d'un phénomène ou la plausibilité d'un scénario en fonction de la facilité avec laquelle des exemples qui l'illustrent viennent à l'esprit. Les auteurs distinguent plusieurs facteurs susceptibles de nourrir ce phénomène, illustrés par des exemples concrets : la plus grande prégnance émotionnelle de la vue d'un incendie que de la lecture d'un article de presse dans la capacité à évaluer la probabilité d'un tel accident (Slovic (2002) parlera plus tard d'*heuristique affective*) ; l'influence du nombre d'exemples de mots de chaque catégorie qui viennent à l'esprit pour évaluer si la langue anglaise contient plus de termes abstraits ou concrets ; l'influence de la capacité à imaginer et à se représenter différents événements dans le calcul de leurs probabilités respectives ; le fait de surestimer systématiquement la cooccurrence de deux événements lorsqu'ils sont considérés comme naturellement liés ; etc.
- La troisième (l'heuristique d'*ajustement* après *ancrage*) est utilisée pour évaluer un résultat par approximations successives à partir d'une valeur initiale. Un biais survient lorsque le résultat dépend trop de la valeur initiale choisie, comme dans les cas où les ajustements sont systématiquement insuffisants : c'est ainsi que le résultat rapide (calculé mentalement en moins de 5 secondes) du produit 8 x 7 x 6 x 5 x 4 x 3 x 2 x 1 est systématiquement sous-évalué (2'250 en moyenne au lieu de 40'320), et que l'ancrage des premières estimations (en lecture de gauche à droite) conduit à des réponses encore plus faibles pour le produit 1 x 2 x 3 x 4 x 5 x 6 x 7 x 8 (512 en moyenne)[32].

Au cœur de la théorie de Kahneman et Tversky, on trouvera plus tard (Kahneman, 2002) la notion d'*accessibilité*, développée par Higgins (1996) et désignant littéralement « la facilité avec laquelle des contenus mentaux particuliers viennent à l'esprit » (Kahneman, 2002). Car dans les trois exemples d'heuristiques décrites ci-dessus, il est clair que l'*accessibilité* mentale d'une idée la rend toujours plus propice à être employée pour traiter une information donnée, et donc de conduire à un jugement biaisé car non objectif.

Nombre d'exemples indiqués par Tversky et Kahneman pourraient être interprétés en termes de psychologie et de statistique naïves, de conceptions fausses et de calculs contre-intuitifs de probabilités. De leur côté, ils parviennent systématiquement à les présenter sous la forme d'heuristiques employées à mauvais escient. C'est ce qui nous laisse penser que les deux approches sont très complémentaires et compatibles. Mais surtout, si les auteurs tirent de leur article la conclusion qu'une meilleure compréhension de ces biais spécifiques permettraient de corriger les erreurs de jugements faits par les acteurs économiques lors de l'utilisation des heuristiques correspondantes, nous en déduisons de manière plus générale deux éléments importants que nous réutiliserons dans la construction du modèle allostérique : 1/ le fait que l'usage d'une conception erronée peut n'être que le résultat de l'emploi d'une mauvaise heuristique, et 2/ qu'apprendre ne consistera pas seulement à changer de conception, mais parfois simplement activer ou à désactiver (inhiber) la bonne ou la mauvaise heuristique.

[32] Nous retrouverons ce phénomène dans l'expérience de la course des balles (expérience de Galilée), dans la description de notre recherche expérimentale : lorsque l'on demande à un enfant de prévoir la différence de mouvement entre une balle de tennis et une boule de pétanque lâchées simultanément d'une hauteur de 2 mètres, ils prévoient en général que la seconde arrivera après la première. Si une fois l'expérience réalisée (qui montre qu'elles touchent le sol en même temps, on leur demande à quoi ils s'attendaient, ils indiquent une différence de quelques centimètres. Mais si on leur demande avant l'expérience d'évaluer la différence entre les deux, la moyenne des estimations est plus proche de la valeur d'un mètre.

C'est ce qui fait l'objet des développements dans le paragraphe *3.4.3.6. Les mécanismes de l'inhibition cérébrale*. Le concept d'*accessibilité* n'est d'ailleurs pas sans rappeler le modèle-cadre (ou taxinomie) dit « SRK » de Rasmussen (1983), qui définit trois niveaux de contrôle cognitif selon le degré d'expertise nécessaire, et que nous développons dans le paragraphe suivant.

- Modèle SRK

Ce modèle, développé par le danois Jan Rasmussen au début des années 80, décrit le contrôle cognitif humain comme étant capable de traiter les informations selon trois niveaux : les niveaux basés sur les habiletés (*Skills*), les règles (*Rules*) et les connaissances (*Knowledge*) :

- Un comportement basé sur les *habiletés* (S, *Skills-based behaviour*) requiert très peu ou aucun contrôle conscient pour exécuter une action une fois qu'une intention est formée ; de type *réflexe*, il est également connu sous la dénomination de comportement *sensorimoteur*. La performance est lisse, automatisée et consiste en des schèmes de comportement hautement intégrés dans la plupart des contrôles basés sur les habiletés (Rasmussen, 1990). Rouler à vélo est par exemple considéré comme un comportement basé sur les habiletés dans lequel peu d'attention est requise pour le contrôle une fois que l'habileté est acquise.
- Si l'individu est confronté à une situation nouvelle, il commence par chercher s'il n'a pas déjà résolu des difficultés analogues. Sa réaction n'est plus automatique, mais elle repose sur la mise en place de procédures d'action contrôlées par des règles (R, *Rule-based behaviour*) ou des procédures dérivées d'expériences antérieures. Un opérateur de conduite se réfèrera à un recueil de consignes pour savoir comment traiter un cas peu fréquent. Les hôpitaux disposent quant à eux de procédures précises pour gérer les alertes au feu : quiconque assiste à un feu peut suivre les étapes nécessaires pour assurer la sécurité, sans d'ailleurs aucune connaissance de la conduite à adopter en cas de feu.
- Enfin, s'il doit faire face à un problème qu'il ne connaît pas du tout, qui ne ressemble en rien aux situations qu'il a déjà rencontrées, l'individu ne dispose pas de schéma de résolution adapté. Pour trouver une solution, il tente de bâtir des raisonnements permettant d'atteindre ses objectifs, sur la base de ses seules connaissances, sans disposer de règles sur lesquelles s'appuyer. Les décisions adoptées peuvent être plusieurs fois remises en cause. On parle alors de raisonnement basé sur les connaissances (K, *Knowledge-based behaviour*). Contrairement aux deux cas précédents, les opérateurs doivent connaître les principes fondamentaux et les lois qui gouvernent le système. Dès lors, puisqu'ils doivent prendre des décisions à partir de leur analyse dudit système, la charge mentale nécessaire est plus élevée que lorsqu'ils activent des comportements basés sur les habiletés ou sur les règles.

Cette théorie a été développée initialement pour répondre à un problème précis, celui de la formation d'opérateurs de conduite de dispositifs techniques complexes, comme le contrôle aérien ou les centrales nucléaires. En facilitant les comportements basés sur les habiletés et sur les règles dans les tâches familières, des ressources cognitives supplémentaires peuvent être consacrées aux comportements basés sur les connaissances, qui sont important pour gérer les événements non anticipés.

Mais pour ce qui concerne notre étude, elle peut être très naturellement reliée à la notion d'heuristique de Kahneman et Tversky, avant que nous ne la rapprochions du modèle allostérique de l'apprendre : dans le mode S, une heuristique accessible est employée rapidement ; dans le mode R, c'est la conception adaptée qui est choisie par l'opérateur ; dans le mode K, la conception doit être construite à partir des conceptions pré-existantes. On comprend notamment l'intérêt de l'approche de Rasmussen à la lecture du texte de la conférence Nobel de Kahneman (Kahneman, 2002) : « *From the earliest days, the research that Tversky and I conducted was guided by the idea that intuitive judgments occupy a position between the automatic operations of perception and the deliberate operations of reasoning* ». Elle précise en effet les différents niveaux qui s'étagent entre le réflexe de pensée pur et le raisonnement pur.

- Systèmes 1 et 2

Kahneman rapporte une distinction similaire mais différente entre deux types de processus cognitifs (tableau 3), que Stanovich et West (2000) ont nommés *système 1* (ou *intuition*, rapide et associative, semblable aux mécanismes de la perception, mais difficile à apprendre) et *système 2* (ou *raisonnement*, nécessitant efforts et application, mais relativement flexible). Les deux systèmes peuvent bien entendu être sollicités simultanément (ou successivement), le raisonnement venant conforter (ou infirmer) une première impression.

	PERCEPTION	INTUITION SYSTEM 1	REASONING SYSTEM 2
PROCESS		Fast Parallel Automatic Effortless Associative Slow-learning	Slow Serial Controlled Effortful Rule-governed Flexible
CONTENT	Percepts Current stimulation Stimulus-bound	Conceptual representations Past, Present and Future Can be evoked by language	

Tableau 3 : Distinction entre systèmes de pensée 1 et 2 en fonction des processus à l'œuvre et de leurs objets.

La robustesse du système 1 est toutefois telle que le système 2 n'est parfois pas même sollicité lorsque le premier a fourni un résultat intuitif probant. Ainsi, à la question : « *Si une batte et une balle de base-ball coûtent ensemble $1,10 et que la batte coûte $1 de plus que la balle, combien coûtent-elles séparément ?* », 50% des étudiants de l'Université de Princeton indiquent le résultat fourni par le *système 1* ($1 pour la batte et $0,1 pour la balle) sans le confronter à la vérification la plus élémentaire du *système 2* (1 - 0,1 = $0,9 et non pas $1) qui infirmerait le résultat de l'heuristique intuitive.

Le choix de l'heuristique peut d'ailleurs être guidé par le contexte, comme c'est le cas dans les deux exemples de la figure 30 : le caractère du milieu est vu comme un B dans la première ligne, et comme un 13 dans la seconde. Pour expliquer ce type de choix mentaux spontanés, la notion d'*accessibilité* de Higgins évoquée ci-dessus (1996) est particulièrement pertinente. Nous reviendrons sur ces différentes notions dans la construction du modèle allostérique formalisé, en les illustrant notamment par d'autres exemples concrets.

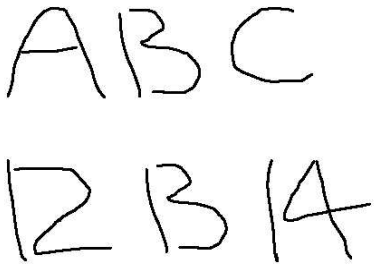


Figure 30 : Choix spontané d'heuristiques particulières en fonction du contexte (chiffres ou lettres). Le symbole médian, identique dans les deux cas, n'est pas interprété de la même manière.

3.4.3.6. Les mécanismes de l'inhibition cérébrale

- Un processus central de l'adaptation cognitive

La mise en évidence des heuristiques de Kahneman dans les mécanismes de jugement ou de prise de décision, ainsi que des processus cognitifs tels que les comportements S, R, K de Rasmussen ou les systèmes 1 et 2 de Stanovich & West conduisent naturellement, comme nous l'avons déjà sous-entendu plus haut, à s'interroger sur la capacité de l'esprit humain à inhiber certains de ces processus et à ne pas se limiter, comme le fait Kahneman, à l'additivité et au contrôle mutuel des actions mentales.

Ainsi, dans une situation-problème donnée, on peut imaginer que le système 2 vienne corriger les résultats fournis par le système 1 mais, comme nous l'avons vu dans l'exemple de la batte et de la balle de base-ball, la probabilité que cela se produise est faible lorsque ces résultats semblent fiables. Pour apprendre à éviter ce type d'erreur, il conviendrait alors d'explorer la possibilité d'entraîner notre système 1 à ne plus utiliser la mauvaise heuristique, et non pas seulement d'entraîner notre système 2 à le contrôler.

De la même manière, dans le cadre du modèle SRK, on n'espérera pas que les modes R et K contrôlent le mode S pour corriger les erreurs de jugements spontanées : par un phénomène identique à celui qu'illustre l'exemple des balles et battes de base-ball, on comprend que le mode S entraînant une charge cognitive plus faible que les autres modes (Sweller & Chandler, 1991), ces derniers ne soient pas sollicités lorsque le premier a fourni un résultat crédible. Il est par suite nécessaire d'apprendre en premier lieu à inhiber le mode S erroné, de manière à ce que le mode R ou le mode K puissent se mettre en action.

Dans un petit jeu célèbre et facile à réaliser entre amis, le meneur choisit une personne coopérative et lui demande d'indiquer rapidement la couleur des objets qu'il lui montre : une feuille de papier (blanche), un T-shirt (blanc), un encadrement de fenêtre (blanc), un plafond (blanc), etc. Puis, sans transition, il pose la question : « *Que boit la vache ?* ». Quiconque n'a jamais fait l'exercice a toutes les chances de répondre « *Du lait…* » à cette question, à moins d'un énorme effort d'inhibition, suscité par exemple par une très grande méfiance s'il a pris conscience dès le début qu'il y aurait un piège. En revanche, lorsqu'on a été piégé une fois, on parvient facilement à désactiver le mode S pour mettre en œuvre le mode R (les animaux boivent de l'eau, la vache est un animal, donc la vache boit de l'eau) qui s'y substitue, certes avec un effort plus important (figure 31).

Figure 31 : « Que boit la vache ? »

Et justement, si l'idée selon laquelle l'inhibition est un processus central de l'adaptation cognitive n'est pas nouvelle (MacMillan, 1996 ; Smith, 1992), la question du lien entre apprentissage et inhibition de processus mentaux fallacieux fait l'objet de recherches de plus en plus suivies à l'interface entre sciences cognitives et sciences de l'éducation. C'est notamment ce à quoi s'emploie l'équipe d'Olivier

Houdé, à Paris et à Caen[33]. Citant Berthoz (1997) lorsqu'il écrit : « *le cerveau est un cheval fougueux que l'inhibition dirige tel le cavalier avec ses rênes* », il précise (Houdé, 1999) : « *l'inhibition neuronale est l'un des mécanismes fondamentaux de la production du mouvement et de sa flexibilité, sans doute le principal mécanisme de l'apprentissage sensori-moteur. De même, en psychologie de l'enfant, il apparaît que l'inhibition sous ses multiples formes, de la programmation motrice au raisonnement logique, est un facteur essentiel du développement cognitif* ».

- Activation des schèmes de pensée ou contrôle inhibiteur de l'information ?

D'inspiration Piagétienne, Houdé a systématiquement revisité les travaux du psychologue genevois pour en montrer les erreurs d'interprétation, preuves issues des méthodes d'imagerie cérébrale à l'appui. Dans plusieurs articles publiés depuis les années 1990 (voir notamment Houdé 1995 et 1997), il a montré qu'à l'explication constructiviste du développement cognitif de l'enfant par un mécanisme de coordination ou de co-activation de schèmes de pensée, on pouvait très souvent substituer un autre mécanisme, moins intuitif mais plus performant, pour interpréter les observations expérimentales : le contrôle inhibiteur de l'information. Dans le texte cité plus haut (Houdé, 1999), il décrit les deux paradigmes concurrents qui permettent d'interpréter la manière dont l'esprit traite deux informations simultanées dont l'une serait pertinente et l'autre non.

Le premier, qu'il conteste, considère l'attention sélective comme une fonction d'activation : l'information pertinente est sélectionnée par un mécanisme attentionnel d'activation alors que l'autre est négligée et que son stimulus se dissipe dans le temps. A cette conception classique de l'attention-activation, il oppose l'analyse alternative de l'attention-inhibition : « *Selon cette analyse, le mécanisme essentiel de la sélection attentionnelle est l'inhibition, ou blocage actif de l'information non pertinente en mémoire de travail. Dans ce cas, le traitement cognitif de l'information pertinente, ultérieur à la sélection, ne s'opère pas en raison d'une activation-facilitation spécifique, mais du fait qu'il n'y a plus d'interférence avec l'information non pertinente inhibée* ».

L'effet d'*amorçage négatif* (« negative priming » en anglais), introduit par Tipper en psychologie cognitive (1935), est notamment l'un des concepts invoqués pour prouver la réalité du contrôle inhibiteur de l'information lors de la réalisation d'une tâche. En effet, avec les méthodes d'investigation modernes décrites plus haut, il est désormais possible de mesurer finement les temps de réponse d'individus de tous les âges dans des situations variées. Supposons alors qu'un sujet doive sélectionner un stimulus S1 pertinent lorsqu'il est confronté simultanément à S2 (non pertinent), puis que dans un deuxième temps, il soit a/ exposé au même S2 (seul pertinent cette fois) ou b/ exposé à S3 (seul pertinent également, mais nouveau).

Dans le cadre du paradigme de l'attention-activation, on devrait observer un amorçage positif dans le cas où la deuxième tâche est réalisée rapidement après la première, c'est-à-dire un temps de réaction inférieur pour S2 que pour S3, parce que la dissipation de S2 suite à la première phase n'aura pas été complète. En revanche, si le mécanisme prépondérant est de type sélection-inhibition, alors l'effet sera inverse : S2 ayant été inhibé lors de la première phase, le temps de réaction pour prendre en compte S2 dans la deuxième phase sera plus long que pour S3. Qu'en est-il ?

- Des preuves de l'amorçage négatif

De nombreuses études ont montré l'existence de l'amorçage négatif, et notamment celle de Houdé sur la célèbre tâche de Piaget consistant à présenter à des sujets des rangées de longueurs différentes d'un nombre égal de jetons, et de lui demander où il y en a le plus. Piaget observait que jusqu'à l'âge de 6-7

[33] Instituteur de formation initiale, Olivier Houdé est professeur de psychologie à l'université Paris-V (Sorbonne) et dirige l'équipe Développement et fonctionnement cognitifs dans le groupe d'imagerie neurofonctionnelle UMR 6194 du CNRS et du CEA.

ans, l'enfant se trompe en déclarant que la rangée la plus longue contient le plus de jetons, commettant une erreur d'intuition perceptive. Piaget en déduisait que jusqu'à cet âge, l'enfant ne disposait pas encore du concept de nombre, ce que de nombreuses études ont récemment démenti. Celles de Karen Wynn, notamment (1992, 1998), qui ont conduit au paradigme du même nom, consista à utiliser des figurines de Mickey pour montrer que les bébés de 4 mois connaissent les résultats d'opérations algébriques telles que 1 + 1 = 2 ou 2 – 1 = 1 (voir paragraphe *3.4.3.1. Les théories naïves*). Comment expliquer alors les erreurs des enfants dans le test de Piaget ?

Avec son équipe (Houdé & Guichart, 2001), Houdé a démontré que ce qui pose réellement problème à l'enfant dans cette tâche, ce n'est pas le nombre en tant que tel, puisqu'il l'utilise bien plus tôt, mais c'est d'apprendre à inhiber la stratégie perceptive inadéquate, c'est-à-dire à inhiber l'illusion « longueur égale nombre ». Reprenant la tâche de Piaget avec des enfants de 8 ans, il leur a proposé sur ordinateur deux situations : d'abord comme Piaget, deux rangées de longueur inégale composées du même nombre de jetons, puis deux rangées dont la plus longue contient le plus de jetons. Il leur a alors proposé ces deux situations dans l'ordre inverse, leur demandant à chaque fois si les deux rangées comportaient le même nombre de jetons et mesurant leur temps de réponse. Résultat : les enfants mettent plus de temps à résoudre la situation où la longueur varie avec le nombre si elle leur est proposée en second. Cet effet d'amorçage négatif prouve, à partir d'un exemple concret et parfaitement maîtrisé, qu'ils ont inhibé l'illusion « longueur égale nombre » pour résoudre la première situation, et qu'ils doivent la réactiver ensuite. Selon Houdé (Théodule, 2005) : « *À cet âge, si les enfants avaient atteint le stade du nombre au sens de Piaget, leur temps de réponse serait constant, quel que soit l'ordre des situations. Ils n'auraient plus besoin d'inhiber la stratégie perceptive erronée* ».

- Le recours à l'imagerie cérébrale

Ces résultats obtenus par des mesures de l'attention chez les nourrissons ou des temps de réponses chez les enfants sont peu à peu complétés et prolongés par les techniques d'imagerie cérébrale, qui permet une visualisation non seulement des processus mentaux en temps réel, mais également et surtout des effets sur le cerveau de l'apprentissage par l'inhibition des heuristiques non appropriées. La technique la moins intrusive est l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf)[34], pour laquelle une étude passionnante est en cours auprès d'enfants (Houdé, 2009). Cette dernière suppose une préparation très précise des jeunes sujets, qui sont par exemple entraînés à rester immobiles et à répondre à des tests lors d'activités en classe où les chercheurs les placent dans des tentes cylindriques préfigurant le scanner dans lequel ils seront placés ultérieurement.

Les premières études ont toutefois été menées par tomographie à émission de positons (TEP), sur des adultes auxquels elle est réservée parce qu'elle implique l'injection d'un marqueur radioactif chez le sujet. Celle qui a été menée par Houdé et le couple Tzourio-Mazoyer à l'université de Caen (2003) est particulièrement intéressante car elle montre ce qui se passe dans le cerveau de jeunes adultes avant et après la correction d'une erreur de raisonnement, c'est-à-dire avant et après l'apprentissage de l'inhibition d'une stratégie inadéquate. Ils ont en effet pu mettre en évidence une très nette reconfiguration des réseaux cérébraux, depuis la partie postérieure du cerveau impliquée dans la perception, vers la partie antérieure préfrontale siège de la logique et du contrôle (et donc de l'inhibition).

Mieux, cette étude semble démontrer le rôle de l'émotion dans le contrôle inhibiteur de l'information, ce qui n'est pas sans rappeler l'*heuristique affective* de Slovic *et al.* (2002) déjà évoquée plus haut. Elle porte sur un test de logique conditionnelle, auquel ont été soumis des sujets sains et volontaires : leur tâche était de rendre *fausse* la proposition « *S'il n'y a pas de carré rouge à gauche, alors il y a un cercle jaune à droite* » en sélectionnant des formes géométriques parmi celles qui sont présentées à la figure 32.

[34] Voir plus haut la description de ces techniques expérimentales.

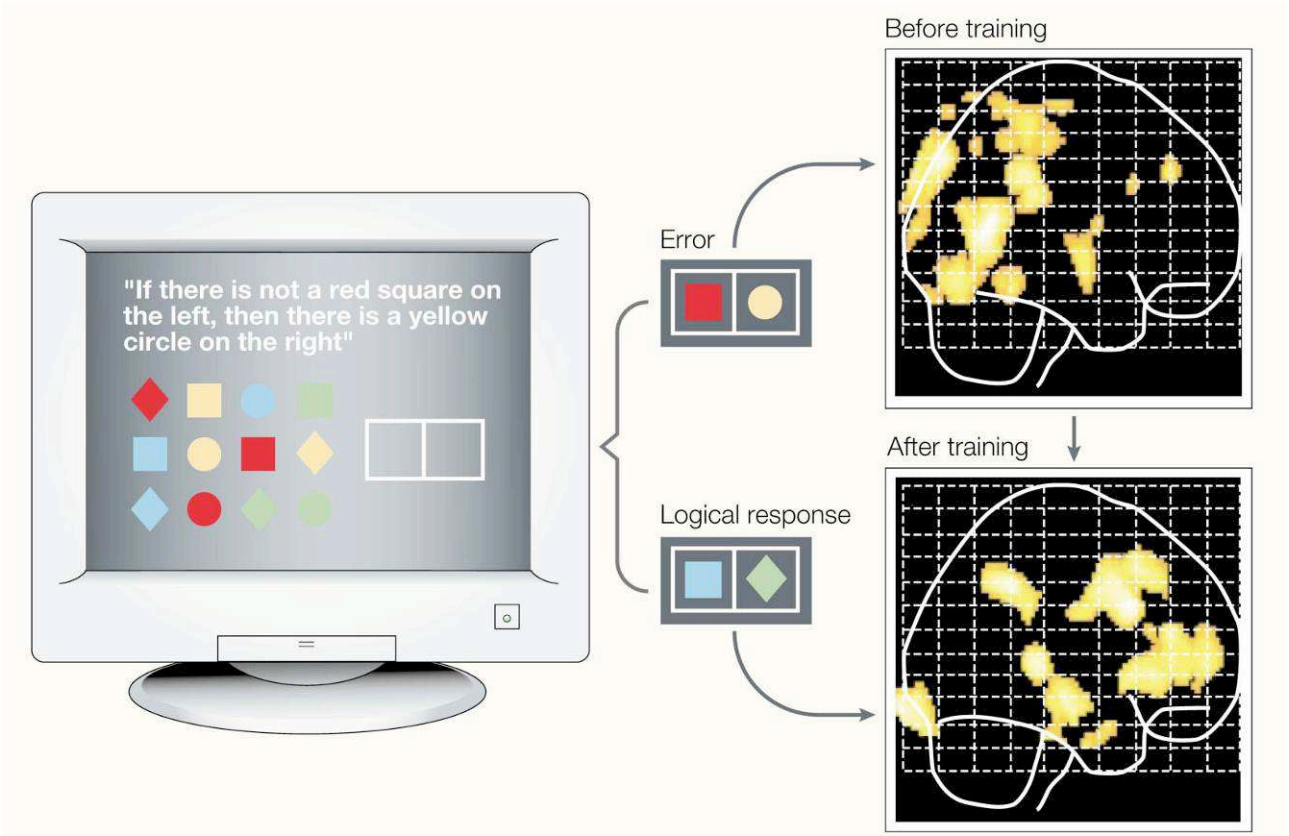


Figure 1 | **Imaging error-inhibition training in a deductive logic task.** The results from positron emission tomography show a clear reconfiguration of the activation pattern, which shifted from the posterior part of the brain when subjects relied on an erroneous perceptual strategy (right, top) to the prefrontal part when they accessed deductive logic (right, bottom). Adapted, with permission, from REF. 18 © (2000) The MIT Press.

Figure 32 : Description de l'expérience de Houdé et Tzourio-Mazoyer (in *Nature reviews neuroscience*, juin 2003).

Dans cette expérience, la plupart des témoins placent un carré rouge à gauche d'un cercle jaune… et se trompent, victimes d'un appariement perceptif et piégés par la perception des figures citées dans la règle. Le même phénomène se produit lorsqu'on demande à un sujet d'indiquer les couleurs des mots suivants à voix haute : **VERT JAUNE ROUGE BLEU JAUNE VERT ROUGE BLEU**.

Pour répondre convenablement, il suffit en effet de choisir une situation où l'antécédent de la règle est vrai, et le conséquent faux : par exemple, un carré vert à gauche et un losange bleu à droite. L'expérience se poursuit alors en une seconde phase, lors de laquelle les témoins sont placés en situation d'apprentissage selon deux techniques, l'une appelée froide, l'autre chaude. Dans la première technique, l'expérimentateur explique aux témoins, placés face à un test de même acabit que le premier, la logique du test. Dans la deuxième technique d'apprentissage, les témoins sont en plus « conditionnés » par des alertes du type : « *Attention, il y a un piège ! Vous pouvez vous tromper ! Il faut y résister !* ». Enfin, dans une troisième étape, tous sont replacés devant le premier test.

Une première observation indique que les sujets passés par l'apprentissage « froid » refont davantage la même erreur que les autres, prouvant le rôle du contrôle affectif sur l'inhibition de l'heuristique correspondant au biais d'appariement perceptif. Chez eux, les zones du cerveau activées pour résoudre le problème sont les mêmes que lors de la première phase. En second lieu, l'observation des clichés d'imagerie présentés à la figure 32 permet de constater que chez les témoins du deuxième groupe, chez qui l'émotion a été associée à l'apprentissage, les zones cérébrales activées sont très différentes, situées notamment dans le cortex préfrontal ventro-médian droit (CPVM), une zone connue pour associer les émotions et le raisonnement.

- Les formes de l'inhibition

Ainsi non seulement ces types d'études indiquent-t-ils la capacité d'un sujet à inhiber une heuristique inappropriée au cours d'un apprentissage, mais ils montrent que cette inhibition peut être renforcée par un stimulus d'ordre émotionnel. De l'ensemble de ces réflexions, on peut d'ailleurs extraire une sorte de typologie des différentes formes d'inhibition, illustrée par le tableau 4 qui tente notamment de faire le lien avec les approches de Kahneman, de Rasmussen et de diSessa. On y a rajouté l'inhibition latente, processus inconscient permettant de faire le tri dans les stimuli et informations envoyées par l'environnement, et l'inhibition mémorielle qui concerne les souvenirs. Ce tableau sera réévoqué dans le paragraphe *6.3.4.4. Des (méta)conceptions de contrôle*.

FORMES DE L'INHIBITION	**INCONSCIENTE**				**CONSCIENTE**	
	Latente		**Intuitive**	**Mémorielle**	**Décisionnelle**	**Raisonnée**
	Perceptive	Attentionnelle				
Exemples	*L'odeur d'un parfum après saturation des capteurs olfactifs*	*Le tic tac de l'horloge*	*Chez l'adulte, le biais d'appariement « longueur = nombre »**	*Le repas d'hier* *Un traumatisme de l'enfance*	*Le chiffre 13 ou la lettre B** *Que boit la vache ?**	*Rendre la règle fausse** *Nommer les couleurs**
Chez Kahneman	-		*Système 1*	-	*Système 2*	
Chez Rasmussen	-		Mode S	-	Mode R	Mode K

Tableau 4 : Essai de typologie des différentes formes d'inhibition.
Les exemples marqués d'un astérisque rappellent ceux décrits plus haut dans le texte.

Si les implications pédagogiques de tels résultats ne sont pas sans rappeler le behaviorisme (du moins pour ce qui concerne le rôle de l'émotion dans certains apprentissages procéduraux), le concept d'inhibition sera en conséquence fondamental pour notre étude. Car il pourra indubitablement éclairer l'idée de « déconstruction » des structures de pensées préexistantes exprimée par Giordan dans le modèle allostérique, lui épargnant de rester dans le paradigme des modèles néo-piagétiens des années 70 et 80 (Houdé, 1998) qui sont tous, comme la théorie de Piaget ou celle de Kahneman évoquée plus haut, des modèles de coordination-activation d'unités structurales et non des modèles de sélection-inhibition. Dans un ouvrage important sur le thème de la construction de l'objet chez l'enfant (1991), Diamond écrira notamment : « *le développement cognitif ne doit pas seulement être conçu comme l'acquisition progressive de connaissances (ou de structures de complexité croissante), mais aussi comme relevant de la capacité d'inhibition (en mémoire de travail) de réactions qui entravent l'expression de connaissances déjà présentes* ». L'inhibition nous offrira donc une voie interprétative claire parmi d'autres pour comprendre la manière dont on peut transformer ses conceptions, ou ses heuristiques.

Contre Houdé, nous résisterons toutefois à la tentation de ne plus parler qu'en termes de sélection-inhibition, considérant que les deux approches restent complémentaires. Nous le suivrons toutefois lorsqu'il écrira (Houdé, 1999) : « *Etre intelligent ce n'est pas seulement activer "le rationnel construit", mais c'est aussi et surtout parvenir à inhiber à tout moment, au même âge ou à un âge plus avancé, "l'irrationnel présumé révolu" (qui, dans une situation donnée, peut relever d'une autre forme de rationalité, antérieure ou contemporaine). Il en ressort la nécessité d'une étude précise du rôle du contrôle inhibiteur de l'information dans le développement cognitif* ». Une conception de l'esprit particulièrement intéressante au sens de la cohabitation de schèmes de pensée indépendant et parfois incompatibles. S'inspirant de l'épistémologie de Serres (dans ses *Eclaircissements*, 1992), Houdé

explique en effet comment souvent, chez l'enfant, le temps cognitif se chiffonne : « *les indicateurs des "plis du temps" sont, dans ce cas, 1/ la proximité rationnelle de conduites temporellement éloignées (entre le bébé et l'enfant d'un âge donné ou l'adulte), et 2/ la coexistence possible, à tout moment du développement et avec des décalages inattendus, du "rationnel construit" (permanence de l'objet, nombre, inclusion des classes, etc.) et de sa transgression : "l'irrationnel présumé révolu" (erreurs, biais, apparentes régressions)* ». Une idée que nous réemploierons dans la description de la nature du savoir du modèle allostérique.

Nous constatons tout de même que les études de psychologie de l'enfant se focalisent beaucoup sur les stratégies cognitives et les raisonnements, mais peu sur les connaissances. En d'autres termes, si les concepts d'heuristique et d'inhibition nous seront de la plus grande utilité pour compléter les questions du traitement de l'information et des apprentissages procéduraux, ils devront être associés à la notion de conception et de transformation des savoirs, abordés par ailleurs dans les théories du changement conceptuel.

3.4.4. Apports pratiques

D'autres apports remarquables ou prometteurs des sciences cognitives à l'éducation méritent d'être cités car ils permettent de concevoir des applications pédagogiques directement à partir des observations et/ou des résultats théoriques. Nous en donnons ici cinq exemples.

3.4.4.1. L'apprentissage du calcul et de l'arithmétique

- Observations

De nombreux travaux portent sur le rapport aux nombres du petit enfant et de l'adulte, que Dehaene a rassemblés dans un ouvrage majeur *La bosse des maths* (1997b) puis repris et complétés dans son cours au Collège de France en 2008 (*Les fondements cognitifs de l'arithmétique élémentaire*)[35]. L'essentiel tient toutefois dans la conclusion de ce cours, qui résume à la fois l'état de la question et fixe un double programme pour l'avenir : « *L'intuition arithmétique humaine consiste en un réseau complexe de connaissances qui vont de la capacité d'estimer rapidement la cardinalité approximative d'un ensemble à celle d'anticiper le résultat d'une addition, de juger que 8 est plus grand que 3, ou de voir les nombres dans l'espace et d'évaluer que 3 est plus proche de 1 que de 10. […] Ce noyau de connaissances est déjà présent chez le très jeune enfant et de nombreuses espèces animales, et est associé à un circuit cérébral situé dans la région intrapariétale bilatérale. L'apprentissage des symboles de l'arithmétique formelle s'appuie fortement sur ce sens précoce des nombres, bien que notre compréhension de la manière dont ce dernier est modifié par l'éducation demeure très imparfaite. Ce sera l'une des questions importantes de la recherche à venir. Un enjeu essentiel sera de mieux utiliser ces connaissances afin d'améliorer l'enseignement de l'arithmétique et de mieux comprendre l'origine des dyscalculies* ».

La position de Dehaene est, selon ses termes, « intuitionniste » : elle postule que les fondements cognitifs des mathématiques doivent être recherchés dans une série d'intuitions fondamentales de l'espace, du temps et du nombre, partagées par de nombreuses espèces animales, et que nous héritons d'un lointain passé où ces intuitions jouaient un rôle essentiel à la survie. Selon l'expression d'Elisabeth Spelke, l'arithmétique élémentaire pourrait même faire partie du « noyau de connaissances » de l'espèce humaine, alors que les nourrissons possèderaient un « sens du nombre » inné reposant sur des circuits cérébraux partagés avec certains primates. Les enfants détectent notamment la violation des règles d'addition et de soustraction, au moins d'une façon approximative. Par exemple, lorsqu'ils voient 5 objets, puis 5 autres, disparaître derrière un écran, ils s'attendent à

[35] www.college-de-france.fr/media/stanislas-dehaene/UPL22033_dehaene_res0708.pdf - Dernière consultation le 05/02/2013.

voir apparaître environ 10 objets et expriment leur surprise en regardant plus longuement lorsque l'écran s'abaisse et révèle seulement 5 objets (McCrink & Wynn, 2004 ; Wynn, 1992). Et Dehaene ajoute : « *Les mathématiques se construisent par la formalisation et la mise en liaison consciente de ces différentes intuitions* ». Plusieurs de ses travaux viennent confirmer ces hypothèses, tels ceux qui portent sur les liens entre le nombre et l'espace.

Nous avons déjà cité l'étude de Pica *et al.* (2004) sur la cognition numérique des indiens Mundurucus d'Amazonie. Or Dehaene *et al.* ont montré plus récemment encore (2008) que ces indiens possédaient un sens intuitif des relations nombre-espace et que ce résultat pouvait être généralisé à l'ensemble des humains. Selon Dehaene : « *L'intuition d'une association régulière entre les nombre et l'espace pré-existe à toute éducation en mathématiques* » : aussi, chez les adultes occidentaux, le fait de penser à un nombre ou d'effectuer un calcul peut-il induire un biais spatial, comme dans l'expérience consistant à tenter de trouver intuitivement le milieu d'une suite de 2 ou d'une suite de 9. Dans le premier cas (la suite de 2), un décalage systématique apparaît vers la gauche ; dans le second cas (la suite de 9), vers la droite. En revanche, la nature de ce lien semble varier avec l'éducation mathématique : il est logarithmique jusqu'à 6-10 ans (ainsi que chez les indiens Mundurucus), et devient linéaire ensuite. L'origine de cet effet tiendrait aux liens qu'entretiennent les relations numériques et spatiales dans le lobe pariétal et non à un recyclage neuronal spécifique, du fait du caractère inné de la capacité de numération.

- Conséquences

Quelles applications pédagogiques ce type de résultats sont-ils susceptibles d'entraîner ? Peut-être la reconnaissance du fait que ces biais sont naturels, pour commencer. Leur exploitation dans des outils pédagogiques d'acquisition de l'arithmétique ensuite. Goswami (2006) mentionne à cet égard différents outils pédagogiques, fondés sur des effets de distance, destinés à enseigner aux jeunes enfants les ordres de magnitude des nombres. Elle ajoute : « *The finding that the brain has a preferred mode of representation suggests that teachers should build on this spatial system when teaching ordinality and place value — for example, through teaching tools such as the 'empty number line'* » (Bramald, 2000). Mais ces résultats pourraient surtout conduire à la mise en place d'entraînements spécifiques précoces. L'étude développementale de Gilmore *et al.* (2007) a par exemple montré que l'intuition arithmétique des quantités approximatives précédait et sous-tendait l'apprentissage de l'arithmétique symbolique ; mieux, leur étude permettait de corréler la capacité d'enfants de 5 à 6 ans à manipuler approximativement des nombres de plusieurs dizaines avec leur réussite en mathématiques à l'école. Un résultat à rapprocher de l'étude de Holloway et Ansari (2008) qui ont montré que chez des enfants de 6-8 ans, la variabilité de l'effet de distance au cours de la comparaison numérique prédisait la réussite scolaire en mathématiques. Selon Dehaene, « *Ces résultats suggèrent que l'appréhension de la numérosité approximative et des relations de distance entre les nombres [...] joue un rôle déterminant pour la bonne compréhension ultérieure de l'arithmétique symbolique* ».

Les travaux sur le nombre permettent aussi de mettre en évidence les origines cognitives de la dyscalculie, et de faire émerger des pistes pour son dépistage et son traitement précoce. Des études d'imagerie cérébrale ont ainsi permis d'isoler une région du cerveau (dite intrapariétale) dont l'activation est présente quelle que soit l'opération mathématique effectuée, aussi simple soit-elle, quelle que soit la notation utilisée pour écrire les nombres, même lorsque les nombres sont représentés sous la forme d'ensembles de points, dès le plus jeune âge et dans toutes les cultures qui ont pu être testées (Dehaene *et al.*, 2003). Des lésions intrapariétales précoces pourraient donc être à l'origine de dyscalculies du développement chez certains enfants (Molko *et al.*, 2004).

D'autres zones complétant le cortex intrapariétal bilatéral semblent être impliquées dans les représentations des nombres, mais codant pour des stratégies acquises au cours de l'éducation cette fois. C'est ce qui fait dire à Lemer *et al.* (2003) que « *les lésions intrapariétales focales tendent à*

perturber l'intuition même des quantités numériques, dans des tâches aussi simples que l'addition, la soustraction, la comparaison, ou l'estimation des numérosités, tandis que les lésions des aires périsylviennes ou des noyaux gris centraux de l'hémisphère gauche tendent à perturber les tables arithmétiques mémorisées ». Autant de pistes pour la remédiation thérapeutique.

3.4.4.2. Les mécanismes de la lecture

Des travaux similaires existent pour l'acquisition du langage, l'apprentissage de la lecture et de l'écriture. Laissons de côté le langage qui présente des caractéristiques très particulières, liées à son statut de procédure d'acquisition spécialisée, déterminée génétiquement qui plus est (Pinker, 1994). Il vérifie en effet les critères proposés par Eric Lenneberg (1967) pour identifier une procédure d'acquisition déterminée génétiquement : 1/ apparence universelle à travers l'espèce, 2/ apparence universelle à travers le temps, 3/ calendrier d'acquisition rigide (période critique) et 4/ ne nécessite pas d'enseignement explicite (mais une exposition de l'individu à la compétence à acquérir)[36]. Nous ferons seulement remarquer qu'il permet d'éclairer par contraste l'apprentissage de la lecture et de l'écriture, qui présentent les caractéristiques exactement inverses. Anne Christophe (2008) rappelle notamment : « *On trouve de nombreuses cultures humaines qui ne possèdent pas de langage écrit (alors qu'elles ont un langage oral). On peut retrouver dans l'histoire la date où l'écriture a été inventée. On peut apprendre à lire et à écrire à tout âge, et la seule contrainte semble être que l'apprentissage ne fonctionne pas bien avant l'âge de 5-6 ans. Enfin, l'apprentissage de la lecture s'effectue par l'intermédiaire d'un enseignement explicite* ».

- Observations

Il serait là encore possible de citer l'ouvrage de Stanislas Dehaene intitulé *Les neurones de la lecture* (2007) et son cours au collège de France en 2006 (*Les mécanismes cérébraux de la lecture*)[37], qui proposent un état de la question exhaustif et passionnant. En matière d'alphabétisation, les travaux des laboratoires de sciences cognitives portent aussi bien sur l'identification des aires cérébrales impliquées (reconnaissances visuelle et phonologique des mots, par exemple) que sur les stades de développement de ces aptitudes ou les causes de la dyslexie.

Des sujets périphériques, tels que la justification cognitive de la forme des lettres de l'alphabet, font l'objet d'hypothèses variées et parfois audacieuses, qui s'appuient sur des résultats théoriques développés indépendamment. Dehaene, conformément à sa théorie du recyclage neuronal, propose notamment que le choix de la forme de nos lettres se soit imposé naturellement au cours de l'évolution culturelle de l'alphabet, car il correspond étroitement aux invariants utilisés par notre système visuel pour la reconnaissance des objets. Et il ajoute : « *Les travaux d'Irving Biederman ont montré que la reconnaissance des objets repose largement sur l'extraction, par le système visuel, des propriétés dites « non-accidentelles » de la projection du contour de l'objet en deux dimensions. Il s'agit d'invariants topologiques et projectifs qui concernent notamment la manière dont les fragments de contours se rejoignent aux sommets pour former des jonctions caractéristiques (en forme de T, de L, de Y, etc.). Ces jonctions seraient extraites au cours de la phylogénèse ou de l'ontogénèse du système visuel car elles sont essentielles à la reconnaissance des objets, et elles seraient ensuite réutilisées comme des symboles de l'écriture* ». Et en effet, lorsqu'on présente à des sujets sains des lettres et des objets dont des parties sont effacées, leur reconnaissance est nettement plus lente lorsque ce sont les jonctions, et non les segments, qui sont manquantes.

---

[36] Il existe d'autres types de procédures d'acquisitions spécialisées, telles que la capacité des oies sauvages à s'orienter en fonction des étoiles, à la fois fondée sur des dispositions innées et nécessitant une exposition de l'oisillon au ciel étoilé.

[37] www.college-de-france.fr/media/stanislas-dehaene/UPL60263_SD_resume_06_07.pdf - Dernière consultation le 05/02/2013.

- Conséquences

La plupart de ces travaux relèvent de la recherche fondamentale et, à ce titre, leur portée pédagogique reste encore à déterminer. Nous aimerions toutefois citer l'impact des études cognitives sur une question éducative qui a été récemment largement débattue, avec force polémiques : la comparaison entre les méthodes globale et syllabique pour l'enseignement de la lecture. Car en effet, sur la question spécifique de la lecture, il devient progressivement possible de comprendre les bases neurales qui sous-tendent son apprentissage.

L'essentiel des indications fournies par ces travaux porte sur l'identification de deux voies de lecture. La première voie, dite ventrale, passe majoritairement par l'aire de la forme visuelle des mots, située dans la région occipitale temporale gauche. Chez l'adulte bien entraîné, cette région joue un rôle essentiel dans la lecture rapide, non-consciente et indépendante de la longueur de mots. Son activation est observée en IRMf, alors que son activité décroît avec l'écartement des lettres ou l'inclinaison des mots. Un modèle neuronal de l'architecture de cette région développé par Cohen *et al.* (2008) prévoit en effet qu'au-delà de deux espaces, les neurones-bigrammes permettant l'identification rapide des mots ne fonctionnent plus. L'expérience a par ailleurs révélé qu'au-delà de ce seuil, en effet, la lecture était considérablement ralentie et affectée par la longueur du mot, suggérant une lecture attentive, avec effort, lettre à lettre.

Lors de la lecture avec effort, c'est alors la seconde voie, dite dorsale, qui est activée. Elle est localisée dans un vaste réseau du planum temporal gauche, une région impliquée dans la conversion entre les lettres et les sons. Une étude citée par Goswami (2006) montre en outre que les bons lecteurs des langues à l'orthographe transparente (où toutes les lettres sont prononcées comme dans l'italien) utilisent davantage cette seconde voie de lecture que les lecteurs des langues non transparentes (français, chinois) pour lesquels la première voie est favorisée (Paulesu, 2001).

Que peut-on en déduire pour la pédagogie, et que ne faudrait-il surtout pas en déduire ? La réponse à la première question est simple : les bons lecteurs utilisent une approche globale du mot pour décoder les phrases rapidement, et les mauvais lecteurs, restés au stade du b.a.-ba, ânonnent syllabe par syllabe, voire lettre par lettre. A la seconde question, et bien que la tentation soit grande de le faire, la réponse est de s'interdire de déduire de ces résultats l'idée selon laquelle l'enseignement de la méthode globale formerait de bons lecteurs, et celui de la méthode syllabique de mauvais lecteurs. Car l'apprentissage de la lecture ne suit peut-être pas les mêmes voies que sa pratique experte.

- Un modèle cognitif de la lecture

C'est ce qu'ont cherché à comprendre les chercheurs du *Laboratoire de sciences cognitives et psycholinguistiques* (LSCP) à l'ENS (Paris). Sur le modèle présenté à la figure 33, Christophe (2008) dispose au centre le dictionnaire mental, ou *lexique*, qui contient l'ensemble des mots de la langue connus par un locuteur donné. La représentation lexicale comprend la forme sonore des mots (lexique phonologique), leur orthographe (lexique orthographique) ainsi que leur sens (non représenté). Ce modèle de lecture reprenant les résultats exposés ci-dessus est décrit dans l'encadré suivant (Christophe, 2008).

« *De bas en haut, on a représenté les procédures qui permettent de reconnaître les mots à partir du signal de parole : on calcule tout d'abord une représentation phonologique, qui contient les sons individuels, puis cette représentation est utilisée pour identifier la forme phonologique du mot correspondant (ici, le mot « cheval »). De haut en bas, on a représenté les procédures exploitées lors de la lecture : à partir du texte écrit, nous calculons une représentation des lettres constituant ce texte, la représentation alphabétique. Puis, on voit qu'on peut utiliser deux voies différentes pour accéder au lexique : soit la voie directe, représentée par la flèche en pointillés qui relie directement la représentation alphabétique à la représentation orthographique des mots. Soit une voie indirecte, représentée par la*

flèche en tirets, qui consiste à transcrire les lettres en sons individuels, pour construire une représentation phonologique de cette suite de lettres. Ensuite, on accède au lexique par le biais du lexique phonologique, de la même manière que si on avait entendu ce mot prononcé à voix haute ».

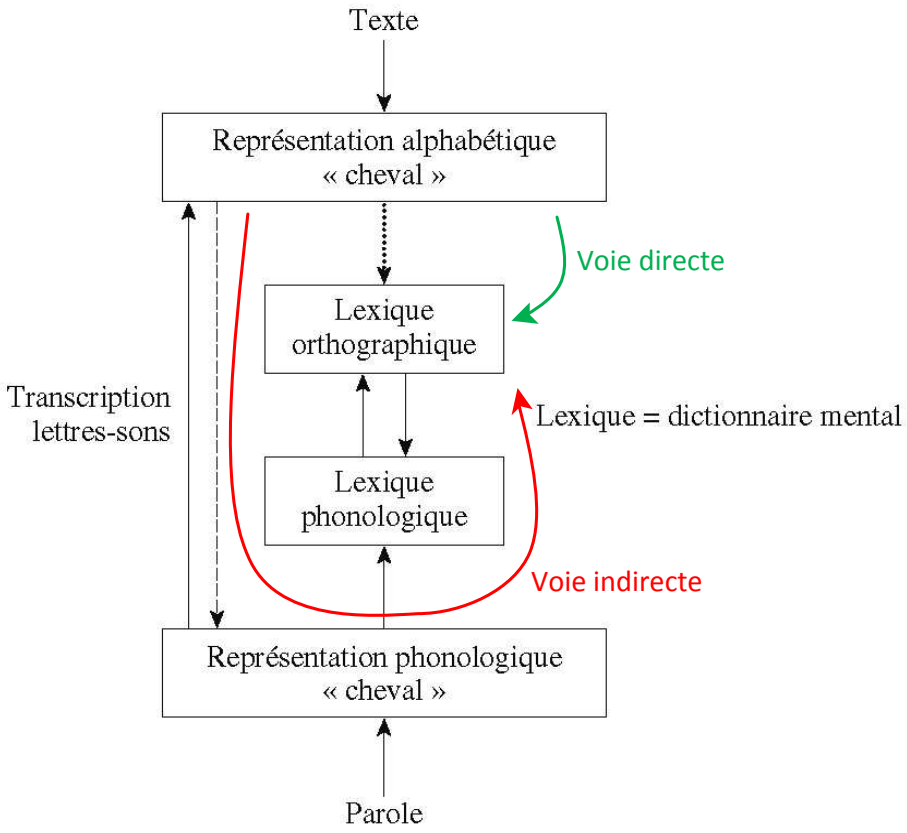


Figure 33 : Modèle cognitif de la lecture (Christophe, 2008).

Pourquoi donc ne pas enseigner spontanément la voie directe ? Parce que si la correspondance lettres-sons, mise en œuvre dans la voie indirecte, s'acquiert relativement vite dès l'âge de 4-5 ans, la voie directe nécessite l'existence d'un lexique orthographique étoffé pour fonctionner ; un lexique qui se construit par la visualisation répétée des mots écrits, sur plusieurs années. Autrement dit, comme plaisante Christophe : « *On comprend maintenant pourquoi la méthode globale ne permet pas de « remplir » le lexique orthographique : pour que ça marche, il faudrait qu'un maître lise à voix haute les mots lus par l'enfant, au fur et à mesure qu'il les lit, pendant au moins 4 ans…* ».

Ainsi, très progressivement, la voie directe se développe. Lorsqu'un enfant (ou un adulte) rencontre un mot nouveau, il tente la voie directe et, si elle ne fonctionne pas, emploie la voie indirecte avant de stocker le nouveau mot dans son lexique orthographique, de manière à pouvoir utiliser la voie directe la fois suivante.

Cet exemple est une parfaite illustration de ce que l'application imprudente de résultats produits par les sciences cognitives peut avoir de dangereux. En revanche, une implication inattendue de ce modèle cognitif de la lecture survient malgré tout : si l'enfant construit son lexique orthographique au fur et à mesure de ses rencontres avec les mots, il a fort intérêt à les voir écrit convenablement le plus souvent possible… Aussi la méthode consistant à dire à l'enfant : « *Regarde ce que tu as écrit et corrige ta faute* » est-elle tout sauf productive. Et elle explique peut-être pourquoi les instituteurs ont parfois, à leur grande honte, des doutes sur l'orthographe de certains mots. Qu'ils se rassurent : seules les erreurs de leurs élèves, qui leurs sont imposées quotidiennement, en sont responsable. Il en va de même des

chercheurs qui, à forcent de lire des publications en anglais, ne savent plus choisir entre « langage » et « language », entre « littérature » et « litérature »… Ainsi, au lieu de faire faire corriger les erreurs des enfants par leurs camarades, imaginons plutôt des logiciels de dictée qui, ayant repéré une erreur, la corrigeraient et attireraient ensuite l'attention de l'enfant sur le mot mal écrit !

3.4.4.3. L'attention, l'émotion et la cognition sociale

L'apprentissage n'est pas qu'une question de performance intellectuelle : divers facteurs tels que l'anxiété (envers la lecture ou le calcul), l'attention (en classe ou lors de la lecture) ou la capacité à reconnaître les règles implicites du « métier d'élève » (symboles, implicites sociaux) peuvent en troubler dramatiquement le processus. Or les sciences cognitives s'intéressent désormais beaucoup à ces questions longtemps réservées à la psychologie d'inspiration analytique, à la psychologie sociale et à la microsociologie. On connaît l'exemple du traitement du *TDHA* (ou *trouble déficitaire de l'attention, hyperactivité*) par des médicaments tels que le méthylphénidate (mieux connu sous la marque *Ritalin*®), mais notre compréhension de la manière dont il faudrait préparer le cerveau à mieux profiter de l'enseignement croit régulièrement (Goswami, 2006). Une étude récente a par exemple montré qu'un entraînement de l'attention de 5 jours n'avait pas permis d'augmenter l'attention mais d'accroître significativement la performance d'enfants de 4 à 6 ans dans des tests d'intelligence ultérieurs (Rueda *et al.,* 2005).

Par ailleurs, les recherches sur le rôle de l'amygdale ou des neurones miroirs dans la reconnaissance des émotions peuvent laisser espérer des applications possibles dans le domaine de l'éducation. En particulier, il a pu être montré que les troubles de l'anxiété et les désordres émotionnels liés à la maltraitance lors de l'enfance pouvaient entraîner des troubles de l'attention vers des stimuli menaçants ou la mauvaise interprétation des intentions des autres enfants, conduisant à des comportements inadaptés (Schultz *et al.,* 2004 ; Scott *et al.,* 2001 ; Muris *et al.,* 2000).

3.4.4.4. La protopédagogie et l'épistémologie naïve

Les notions liées de « protopédagogie » et d'« épistémologie naïve » désignent les capacités innées dont disposerait respectivement l'humain de transmettre une information à ses congénères par un processus d'instruction spécifique et de se représenter la manière dont ils l'intègrent (Csibra & Gergely, 2005). Selon Andler (2008), « *Cette [seconde] aptitude reposerait sur un système de communication antérieur au langage et à la capacité de « lire » les intentions d'autrui (la « théorie de l'esprit »), deux capacités humaines fondamentales qui se développeraient justement grâce à cette « proto-pédagogie. […] Cette hypothèse ouvre des perspectives vertigineuses sur le plan théorique et pratique, notamment thérapeutique.* ».

Ces deux notions semblent très prometteuses, parce que les pratiques qui leur correspondent sont d'une part au centre du processus éducatif, et d'autre part si profondément ancrées dans la culture quotidienne et dans l'entendement commun que l'enquête a des chances d'en révéler des aspects cachés, comme semblent l'indiquer les premiers résultats obtenus en croisant psychologie du développement, psychologie évolutionniste, anthropologie, philosophie de la connaissance, philosophie et histoire des sciences. Elles pourraient en particulier être à l'origine d'une théorie de la représentation spontanée de l'apprentissage, comme Carol Dweck l'a fait pour l'intelligence, qui constituerait une manière scientifique et documentée d'accéder aux *modèles implicites d'apprentissage* des enseignants, que nous évoquions dans le paragraphe *2.1.4.1.*

Selon Andler (2008), il s'agirait de « *représentations très probablement complexes et détaillées, impliquant des notions d'autorité, de confiance, de certitude, de correction, de cumulativité, d'identité et différence entre apprenant et enseignant, etc.* ». Andler envisage également l'idée de modèles de l'enseignant : « auto-modèle » de l'enseignant pour lui-même, « hétéro-modèle » de l'enseignant pour l'apprenant... des idées encore lointaines mais qui laissent entrevoir des applications intéressantes. Il

cite encore une perspective correspondant à la « planification de l'action », dans la mesure où l'apprenant doit, dans le cadre de son « métier d'élève », se livrer en permanence à toute une série de tâches planifiées et hiérarchisées, à l'échelle d'une heure de cours comme à celle de l'ensemble de sa scolarité. Ce à quoi s'ajoute enfin une incitation à entretenir la réflexion de l'apprenant sur ses propres processus d'apprentissage, nommée métacognition et également étudiée par les sciences cognitives.

3.4.4.5. La mémoire

Nous terminerons ce panorama par le thème qui est peut-être le plus évident et un des mieux documentés, mais dont les applications pédagogiques semblent se faire attendre. Mémoire sémantique, mémoire épisodique, encodage et récupération, mémoire de travail, à court et à long terme, mémoire adressable par le contenu, variétés d'amnésie, faux souvenirs et confabulations... autant de notions qui démontrent la vivacité d'un champ de connaissances ancré dans une solide tradition de recherche interdisciplinaire, à laquelle ont contribué la psychologie expérimentale, la psychologie du développement, la neuropsychologie, les neurosciences, la philosophie et, bien entendu, l'intelligence artificielle.

Se prêtant particulièrement bien aux études expérimentales par les techniques d'imagerie, la mémoire est un objet qui commence à prendre forme dans l'esprit des chercheurs, qui possèdent même dans certains cas des moyens pour agir sur elle. Ainsi, les résultats obtenus sur le rôle des émotions fortes dans l'encodage des souvenirs permettent d'imaginer le recours à l'administration de bétabloquants, qui affaiblissent la connexion cérébrale entre les zones impliquées dans les émotions et les zones impliquées dans l'encodage des souvenirs, pour prévenir le trouble du stress post-traumatique. Rien de tel n'est encore envisagé au niveau scolaire, et peut-être heureusement, mais ce thème de la mémoire n'étant pas étranger aux compétences scolaires, il est possible que sa compréhension puisse un jour prochain leur venir en aide.

3.4.5. Les « neuromythes », ou ce que les sciences cognitives ne disent pas

Tout le monde a entendu parler de la *sensibilité artistique* du cerveau gauche et de la *rationalité* du cerveau droit, de notre cerveau qui n'utiliserait que 10 % de ses capacités, ou encore de la différence de volumes entre les cerveaux masculins et féminins. En matière d'éducation, plus spécifiquement, on ne compte déjà plus les ouvrages et sites d'information proposant des exercices de gymnastique cérébrale[38] pour mieux apprendre ou des approches pédagogiques fondées sur de soi-disant *recherches* sur le cerveau. Il suffit, pour s'en convaincre, d'effectuer une recherche Internet associant les termes « éducation » et « cerveau ». Hélas, comme nous l'avons vu, très peu de travaux en sciences cognitives sont encore exploitables pour l'éducation et la plupart des produits que Goswani nomme « brain-based learning packages » (2006) sont mal documentés ou mensongers (voir également Pasquinelli, 2012).

Il en va des sciences cognitives comme de toutes les disciplines : dès lors que leurs résultats commencent à être popularisés, souvent par les chercheurs eux-mêmes qui cherchent par là un moyen à la fois de valoriser leurs travaux et de partager leurs découvertes, elles sont reproduites avec plus ou moins de fidélité, voire détournées par des acteurs économiques qui voient là une manière de transférer à leur activité une image d'innovation et de scientificité, et donc davantage de crédibilité. Du côté des utilisateurs et clients potentiels, le besoin et la demande sont immenses, encourageant encore le développement trop hâtif de ces applications ; car comme l'indique Goswani : « *There is a hunger in schools for information about the brain. Teachers are keen to reap the benefits of the 'century of neuroscience' for their students* ». Et l'offre suit : « *At a recent conference held to mark the launch of the Centre for Neuroscience in Education at the University of Cambridge1, teachers reported receiving more than 70 mailshots a year encouraging them to attend courses on brain-based learning* ».

[38] Par exemple : www.mouvement-et-apprentissage.net - Dernière consultation le 05/02/2013.

3.4.5.1. Le mythe des cerveaux droit et gauche et des styles d'apprentissage

Probablement issu d'une surinterprétation de la spécialisation hémisphérique du cerveau, dont les aires spécifiques à diverses facultés ne sont que très rarement disposées de manière symétrique, ce mythe consiste à attribuer à chaque enfant une prédisposition à certaines aptitudes en lui associant une aire cérébrale préférentielle. Ainsi, l'élève de type « cerveau-gauche » aura des facilités dans les domaines du langage, de la logique et des formules mathématiques, des nombres, des séquences et des linéarités et de l'analyse. L'élève de type « cerveau-droit » sera quant à lui plus doué dans l'appréhension des formes, la manipulation spatiale, la perception des rythmes et des images, le dessin, le rêve éveillé et l'apprentissage en interaction. On propose alors aux enseignants de bien équilibrer leurs enseignements « gauche » et « droit » (Smith, 1996).

D'autres formations pour enseignants leurs suggèrent de faire porter à leurs élèves des badges munis des lettres V, A ou K, selon qu'ils apprennent plutôt de manière visuelle, auditive ou kinesthésique, de manière à les faire reconnaître par leurs enseignants. Une pratique qui, en figeant la manière dont on s'adresse à l'élève, risque bien évidemment de le priver de la nécessaire diversité des approches didactiques. Sans compter que, compte tenu de la tendance des adolescents à l'ostracisme, cette pratique est en outre susceptible de participer à de nouvelles ségrégations entre eux, sur des critères pseudo-cognitifs cette fois.

3.4.5.2. Le mythe de la gymnastique cérébrale

La gymnastique cérébrale ne consiste pas, comme on pourrait le penser, en une série d'exercices psychotechniques, mais elle prescrit une série de mouvements du corps qui font appel à diverses aires cérébrales impliquées dans l'apprentissage. Cette idée provient peut-être de recherches telles que celles qui établissent une correspondance entre la perception relative des nombres et la conception de l'espace, comme dans l'effet SNARC déjà cité (Dehaene *et al.,* 1993). Les slogans sont prometteurs : « *In technical terms, information is received by the brainstem as an 'impress', but may be inaccessible to the front brain as an 'express'. This … locks the student into a failure syndrome. Whole-brain learning draws out the potential locked in the body and enables students to access those areas of the brain previously unavailable to them. Improvements in learning … are often immediate* » (Cohen & Goldsmith, 2000). Il existerait même des « boutons cérébraux », quelque part sous les côtes, permettant de préparer le système visuel à l'exercice de l'écriture et de la lecture !

3.4.5.3. Les mythes du développement cérébral

Trois observations issues des études cognitives nourrissent un troisième mythe, qui prend des aspects divers (Andler, 2008). Ces observations sont les suivantes :

1/ Les recherches sur l'acquisition du langage ont montré l'existence d'une fenêtre temporelle lors de laquelle, si l'enfant n'était pas exposé au langage, son apprentissage serait moins complet. Il existe en effet des *périodes critiques* en-dehors desquelles certaines aires du cerveau ne peuvent se développer.

2/ Les mesures physiologiques ont également montré que la synaptogenèse passait par un maximum d'intensité au cours des trois premières années de la vie.

3/ Si le développement du cerveau est sous contrôle génétique, l'environnement auquel il est exposé est riche d'implications et décisif.

Ces données, issues pour certaines de travaux de neurosciences sur l'animal, ont conduit à recommander un « régime » de stimulation cognitive intensive pour les tout-petits dans les pays anglo-saxons. Il en découle en effet un certain nombre d'idées reçues, dont certaines ont pu s'avérer préjudiciables pour l'enfant, ne serait-ce que d'un point de vue psychologique, compte tenu de la pression exercée en leur nom par certains parents (Blakemore & Frith, 2005).

Ces idées reçues sont les suivantes :

1/ Plus nombreuses sont les connexions établies grâce à l'apprentissage dans les toutes premières années de la vie, mieux l'individu sera cognitivement équipé (mythe synaptogénétique) (Bruer, 1997).

2/ La plupart des facultés de l'enfant seront déficitaires s'il n'a pas été exposé en temps utile aux stimulations caractéristiques prises en charge par les aires cérébrales concernées (mythe de la période critique) (Byrnes, 2001).

3/ Plus riche est l'environnement de l'enfant, plus son cerveau se développe (mythe de la sur-stimulation).

L'ensemble se résume en la rumeur selon laquelle « *le très jeune enfant (de la naissance à trois ans) qui bénéficie d'une stimulation intense et variée acquiert un avantage décisif pour le reste de son existence, pour des raisons liées au développement de son cerveau* » (Andler, 2008 ; Bruer, 1999), mais se prolonge dans une seconde idée reçue, selon laquelle l'apprentissage ne serait plus possible après un certain âge. Après les premières années de la vie, aucun nouveau neurone ne se développerait et les neurones lésés ne se régénèreraient jamais, conduisant à une perte d'apprentissage ultra-rapide après l'adolescence.

Depuis une quinzaine d'années, ce mythe jeuniste a fait long feu, compte tenu de l'ampleur et de la généralité du phénomène de plasticité du système nerveux adulte.

3.4.5.4. Le mythe de la neuroplasticité

La plasticité cérébrale peut égaler celle du cerveau de l'enfant dans certaines régions, comme l'a par exemple montré la désormais célèbre recherche de Frackowiak *et al.* (1997) sur l'accroissement en volume de l'hippocampe des chauffeurs de taxi londoniens. Selon Andler (2008), citant Blakemore et Frith (2005) : « *Les recherches en cours soutiennent donc l'idée qu'en réalité, on peut apprendre à tout âge, et qu'il n'est pas absurde de rechercher les moyens de favoriser cet apprentissage* ». Hélas, de cette nouvelle information naît immédiatement un nouveau mythe, en vertu duquel les enseignants sont encouragés à entraîner la plasticité cérébrale de leurs élèves par des programmes spécifiques (Tallal, 2004). Une idée vaine, dans la mesure où toute action sur les structures cérébrales, fut-elle imaginée pour les rendre *plastiques*, entraîne leur structuration (Goswami, 2006).

3.4.5.5. Le mythe des neurones miroirs, « neurones de l'empathie »

Les *neurones miroirs* désignent les cellules cérébrales qui présentent une activité aussi bien lorsqu'un individu exécute une action que lorsqu'il en observe un autre exécuter la même action. Ils sont supposés jouer un rôle dans des capacités cognitives liées à la vie sociale, et notamment dans l'apprentissage par imitation, mais aussi dans les processus affectifs, tels que l'empathie (Carr *et al.*, 2003). Découverte majeure pour certains, hypothèse à vérifier pour d'autres, ils ne sont pas moins dotés d'un puissant potentiel évocateur, inspirant diverses théories plus ou moins farfelues en matière d'éducation autant que de religion.

« *Les neurones-miroirs créent des ponts extérieurs entre deux ou plusieurs cerveaux lors d'une relation entre êtres humains. […] Nous avons de multiples ensembles de neurones-miroirs et les neurosciences en découvrent toujours de nouveaux. Sentiments, idées, comportements y sont reflétés. […] Par conséquent, nous pouvons dire que par nos sentiments, nos intentions, qui se reflètent dans le cerveau des autres, nous provoquons le même état, les mêmes sentiments, intentions, idées. Nous les influençons directement. Nous sommes inconsciemment ou consciemment des pédagogues par rapport aux autres. Cela est encore plus valable pour les enfants qui apprennent en imitant tout naturellement ce qu'ils voient. En présence de l'adulte, ils captent et enregistrent automatiquement ce qui se passe dans le cerveau de l'adulte et l'imitent ; ils apprennent et acquièrent des comportements, des qualités et des capacités. […] Les deux cerveaux, de la mère et de l'enfant, communiquent constamment, par leurs neurones-miroirs. Les neurones-miroirs de la mère envoient à chaque instant des messages, sentiments, images qui sont reçus*

par les neurones-miroirs naissants de l'enfant. Ces messages sont reflétés et engendrent en lui le même désir, les mêmes images, les mêmes idées que celles de sa mère. […]Par ces neurones-miroirs récemment découverts, nous pouvons finalement donner une explication scientifique à ce mystérieux pouvoir formateur de la femme enceinte, dont parlaient dans leurs traités les gynécologues du passé » ; ainsi s'exprime un site d'éducation prénatale pris au hasard sur la toile[39]. Ailleurs, on pourra lire « *Ainsi le prof de gym qui fait une démonstration d'un mouvement est sans doute bien secondé par ce mécanisme neuronal remarquable pour aider à apprendre, par l'imitation* » ; ou la pseudo-réhabilitation du modèle empiriste par les neurosciences…

3.4.5.6. Le mythe des « intelligences multiples »

La théorie d'Howard Gardner (1993, 2004) passe souvent comme un résultat particulièrement fécond des sciences cognitives. Pourtant, il est faux de croire qu'elle s'appuie sur une méthodologie scientifique rigoureuse et, surtout, que les sciences cognitives sont aujourd'hui capables de produire une théorie de l'intelligence, même si elles ont contribué à discréditer la notion d'intelligence générale. En vertu de ses lacunes et de la faiblesse de ses fondements, elle doit donc être maniée avec précaution, notamment dans le domaine de l'éducation où les applications maladroites ou précipitées, comme nous l'avons vu, peuvent rapidement s'avérer funestes. Si cette « théorie » présente l'avantage de faire prendre conscience aux enseignants, formateurs et recruteurs qu'il existe d'autres capacités humaines que celles qui relèvent strictement de l'intelligence logico-mathématique, seule évaluée par les tests de QI par exemple, elle ne peut donc être considérée comme une « théorie scientifique », ne serait-ce que parce que la notion d'intelligence n'est pas correctement définie scientifiquement.

3.4.6. Limites, risques et perspectives

Si, comme nous l'avons évoqué plus haut, les sciences de l'éducation partent des questions posées par l'école pour chercher des solutions dans des disciplines scientifiques, elles prennent peu le risque de proposer des solutions inadéquates et contraires aux besoins du terrain. A l'inverse, les sciences cognitives, avant d'être appliquées à l'éducation, sont avant tout des sciences de laboratoires destinées à comprendre un objet d'étude particulier (le cerveau, la pensée, la conscience) indépendamment de toute application. La question de la transposition du laboratoire à l'école de connaissances académiques se pose donc immédiatement en termes aussi bien de pertinence que d'éthique.

3.4.6.1. La pertinence pédagogique

Nous l'avons maintes fois indiqué, la faiblesse des résultats actuels ne permet pas de les étendre à beaucoup de sujets en matière d'éducation, et lorsque la transposition est réalisée, c'est souvent abusivement. Le *Technology Assessment* (TA), organe dépendant du *Conseil Suisse de la Science*, indique notamment, dans une étude sur l'imagerie cérébrale[40] : « *Quelques spécialistes des neurosciences [allèguent] que les procédés d'imagerie fourniraient des données objectives et précises susceptibles de contribuer à l'amélioration des méthodes d'enseignement. […] Les résultats de ces investigations confirment souvent le savoir de la psychologie et ne donnent dès lors pas motif à un chamboulement des méthodes pédagogiques. Ou alors ils portent sur les processus d'apprentissage fondamentaux du cerveau, sans perspective d'applications concrètes, dans l'enseignement scolaire par exemple.* »

Pourtant, il est également prévisible que la situation change et que, dans les prochaines décennies, les applications possibles soient de plus en plus nombreuses. Daniel Andler (2008) écrit notamment : « *Si les sciences cognitives ne peuvent prétendre être ni devenir la science unique de l'éducation, elles peuvent en revanche apporter des éclairages inédits et précieux sur de nombreux aspects des processus cognitifs*

---

39 www.omaep.com/publications/lectures-conseillees/neurones-miroirs/ - Dernière consultation le 05/02/2013.

40 www.ta-swiss.ch/a/biot_hirn/2006_50A_KF_neuroimaging_f.pdf - Dernière consultation le 05/02/2013.

impliqués dans les processus d'apprentissage et dans les processus éducatifs en général ». Que faudra-t-il alors en penser ? Le *Technology Assessment* suisse donne une première réponse : « *Il existe même un danger de diffusion trop hâtive de nouveaux concepts pédagogiques qui, dans le contexte actuel, politiquement sensible et déjà suffisamment stressé par les réformes en cours, causeraient plus de mal que de bien* », qu'Andler approuve d'ailleurs en ces termes : « *On sait bien que la question […] ne peut être traitée que dans le cadre plus large d'une réflexion sur l'école, laquelle à son tour se situe dans un horizon social, culturel, politique, et que tout cela entremêle la théorie et la pratique, les faits et les normes, les rêves, les nostalgies, les utopies, les idéologies* ». Et il ajoute : « *Le répertoire entier des normes régissant le domaine de l'éducation est une négociation permanente et complexe entre une multitude de groupes sociaux qui se déroule depuis des générations et qui implique au plus haut degré, justement, les générations puisque c'est par l'éducation que chaque génération entend laisser sa marque sur la génération qui la suit* ».

Car en effet l'école n'est pas qu'apprentissage et performance cognitive ; elle est également processus d'intégration sociale, programme de découverte de soi et des autres, plan d'acquisition de la culture commune, émancipation vers un métier, construction de la citoyenneté… autant de dimensions qui peuvent, dans certains cas, entrer en contradiction avec des études scientifiques spécifiques. L'effet dit de « menace du stéréotype » (Steele & Aronson, 1995), particulièrement vivace outre-Atlantique au sein des populations noires, mais également chez nous auprès des jeunes filles, permet de prévoir que, mis en compétition avec des élèves blancs sur une tâche logicomathématique, des élèves noirs obtiendrons de moins bon résultats que s'ils s'opposent seulement les uns aux autres. Faut-il en déduire pour autant la non-mixité raciale des classes de mathématiques, ou la conception d'examens séparés en guise d'applications pédagogiques ? Bien heureusement non, car les apports des sciences cognitives doivent être considérés comme l'un des éléments utiles à la conception de l'école, laquelle doit tenir compte de tous ses objectifs pour construire des enseignements et des conditions d'apprentissage non pas maximaux, mais optimaux.

3.4.6.2. Le risque éthique

On ne peut qu'être surpris de la pauvreté des résultats d'une recherche sur Internet combinant les termes « sciences cognitives » et « éthique » ; *a fortiori* si on y ajoute le terme « éducation », même en anglais. Pourtant, de nombreuses questions se posent déjà, et elles se poseront également à nous lorsqu'à partir du modèle allostérique formalisé que nous souhaitons construire, nous proposerons des pistes pédagogiques ciblées sur les difficultés des élèves.

Eliminons en premier lieu une peur légitime mais encore irréaliste pour de nombreuses années, rapportée par l'étude du TA suisse déjà citée, selon laquelle les techniques d'imagerie donneraient accès à la pensée et pourrait en quelque sorte constituer un viol de l'intimité cérébrale ; on imagine en effet l'usage que pourraient en faire les publicitaires ou les dictateurs. Lire dans les pensées n'est pas pour demain et les dictateurs ou les militaires disposent hélas de moyens plus « simples » pour faire parler leurs opposants. Toutefois, une nuance intéressante est proposée par Martha Farah, neuropsychologue : « *La seule chose pire que d'avoir des gens qui réussissent à lire vos pensées par imagerie cérébrale est probablement d'avoir des gens qui ne réussissent pas à lire vos pensées par imagerie cérébrale et qui croient ce qu'ils lisent* ». On rejoint ici la question des neuromythes évoquée plus haut, et dont l'exploitation maladroite est susceptible de soulever des questions encore plus graves que les connaissances avérées.

En second lieu, on peut probablement craindre un usage commercial massif de ces nouvelles connaissances qui, de pistes issues de recherches prudentes, pourraient rapidement être élevées au rang de principes incontournables, pour le plus grand intérêt de leurs promoteurs. Un contrôle de la communauté scientifique, selon des modalités à définir et déjà explorées par Goswami (2006), mais également une vigilance constante des pouvoirs publics et des enseignants serait alors à promouvoir.

Le troisième écueil porte sur la problématique de l'amélioration de l'être humain ; particulièrement bien traitée par le jeu participatif en ligne *Play decide*[41], caractérisé par l'organisation de débats sur des questions de science et société sensibles, elle conduit à s'interroger sur la pertinence à user de traitements (médicamenteux ou non) sur des individus sains et non plus seulement pour soulager des troubles spécifiques. Des troubles qui, en tout état de cause, doivent bien être définis par rapport à une référence arbitraire, qui définit une norme d'acceptabilité de la performance cognitive humaine concernée. Une vaste littérature existe sur le sujet, qui rejoint la question du *transhumanisme* et de la « convergence NBIC », par ailleurs bien décrite par Bensaude-Vincent (2009). Car enfin, si la science conduit à produire de véritables médicaments permettant d'améliorer la mémoire ou la concentration, devra-t-on les autoriser avant les examens ? Les prescrire à tous pour éviter l'inéquité entre ceux dont les parents en auront les moyens et les autres ? Organiser des tests antidopages à la sortie des interrogations écrites ? Et s'ils sont restreints par les prescriptions médicales, qui fixera la limite ? Déjà des enfants, auparavant considérés comme normaux mais turbulents et mauvais élèves, bénéficient désormais (et c'est heureux pour eux) de TDHA pour soigner ce qui a été identifié comme un trouble anormal du comportement. On parle de plus en plus des « dys » : dyslexie, dyscalculie, dysorthographie, amusie… la frontière entre le dysfonctionnement cognitif et le décrochage passager est parfois facile à définir ; mais gageons que ce ne sera pas toujours le cas avec les connaissances nouvelles que nous fourniront les sciences cognitives, et que des cas similaires à la détermination de la durée de la période d'avortement non thérapeutique autorisée se présenteront souvent à l'avenir, nécessitant l'intervention de comités d'éthique.

Cette question conduit directement au dernier point, qui concerne le dépistage précoce des troubles d'apprentissage et de comportement. Le sujet avait déjà défrayé la chronique en France, au lendemain de l'élection de Nicolas Sarkozy alors qu'il envisageait des tests de dépistage des comportements délinquants dès les premières années d'école. Au-delà de la question de la pertinence et de la légitimité de telles idées, qui frisent ici l'eugénisme, se pose celle de la liberté accordée à l'enfant d'être différent et de se construire dans cette différence. Il n'est besoin de citer ici qu'une source : celle que constitue le magnifique film d'Andrew Nicol, *Bienvenue à Gattaca*, sorti en 1997. Dans ce film, un enfant a malheureusement pour lui été conçu par des voies « naturelles », et non par fécondation in vitro et sélection génétique comme ses semblables. L'histoire raconte son combat pour utiliser ses compétences propres, inférieures mais compensées par la ruse et la volonté, et son rapport avec son frère cadet, sélectionné lui comme il se doit. Il est déjà difficile, dans notre société actuelle, de faire le choix de ne pas posséder de téléphone portable ; mais ce choix porte sur l'environnement de l'individu, non sur son intimité intérieure. Il va de soi qu'en matière de sciences cognitives, cette même perspective fait émerger des enjeux éthiques monumentaux.

Au vu de ces différents risques, le TA Suisse a promulgué un certain nombre de recommandations, qui figurent dans l'encadré ci-dessous[42].

- *Observer attentivement les développements dans les domaines de la neuroimagerie et des neurosciences dans leur ensemble pour prendre les mesures nécessaires le cas échéant,*
- *Initier des dialogues publics portant sur les buts, les potentiels, les résultats, les limites, les conditions générales ainsi que les conséquences possibles de la neuroimagerie,*
- *Légiférer au niveau fédéral pour mettre fin aux contradictions actuelles portant sur la recherche sur des sujets humains et répondre aux exigences internationales,*
- *Améliorer les conditions dans lesquelles se déroulent les recherches en sciences neurologiques cognitives ainsi que le transfert des résultats d'études biomédicales dans les milieux cliniques,*

41 www.playdecide.eu/node/701 - Dernière consultation le 05/02/2013.

42 www.ta-swiss.ch/fr/imagerie-cerebrale/ - Dernière consultation le 05/02/2013.

- *Aspirer à des normes de qualité élevées en termes d'assurance-qualité, de standards professionnels dans les domaines des neurosciences cognitives, de la recherche biomédicale et des pratiques médicales,*
- *Prêter attention aux problèmes relatifs au consentement éclairé, aux résultats inopinés et à la protection des données que soulèvent les techniques de neuroimagerie,*
- *Continuer à étudier les risques sanitaires potentiellement liés aux applications de l'imagerie par résonance magnétique et adapter les consignes de sécurité en conséquence.*

3.4.6.3. Perspectives d'avenir

Ces limites et précautions nécessaires, qui relèvent de la responsabilité inhérente à toute mise en application d'éléments théoriques puissants, quelle que soit la discipline considérée, ne doivent pas faire oublier une autre de nos responsabilités : celle de faire en sorte que toute proposition de réforme scolaire s'appuie de manière explicite sur les meilleures théories disponibles susceptibles d'expliquer l'apprentissage et l'intelligence « *Or,* écrit Bruer (in McGilly, 1994), *dans le débat public sur la réforme scolaire, ce n'est le plus souvent pas le cas. Les recommandations les plus fréquentes – durcir les critères, renforcer l'obligation de rendre compte (accountability), augmenter la fréquence des contrôles des connaissances, créer des marchés de services éducatifs – sont athéoriques sur le plan de la psychologie, étant fondées, au mieux, sur le bon sens et au pire sur des conceptions naïves [cette fois au sens péjoratif] ou dépassées* ».

Au cours des trente dernières années, la recherche cognitive a fait progresser notre compréhension de l'apprentissage et de l'intelligence, il conviendrait donc d'en tenir compte mais la bonne volonté des chercheurs est souvent bloquée par ce qu'Andler qualifie de « *deux formes d'agitation fébrile : techno-politique et philosophico-sentimentale* » (Andler, 2008). Et de poursuivre : « *Les apports théoriques, présents et futurs, des sciences cognitives sont en effet souvent récusés pour deux raisons. D'une part, elles incarnent une approche naturaliste qui apparaît, dans notre culture, comme contrevenant au principe d'indépendance de la sphère de l'esprit par rapport à la sphère de la nature. D'autre part, elles sont abusivement assimilées, comme on le rappelait plus haut, soit à l'intelligence artificielle (ou l'informatique avancée), soit aux neurosciences* ».

Notre propre travail s'inscrit dans cette volonté de faire mieux, mais à partir d'éléments théoriques fiables et précis, en accord avec les pratiques éducatives et contre tous les dogmes et les états d'âme qui bloquent l'enquête. Les modalités de cette recherche sont développées dans les parties suivantes.

Après avoir pu dégager, dans la partie *2. Etat de la question*, les raisons qui faisaient des théories éducatives socioconstructivistes fondées sur la notion de changement conceptuel les meilleures candidates à la réalisation de notre projet (pour autant qu'elles soient capables de revendiquer une approche scientifique), nous avons également montré combien les sciences cognitives, à défaut de fournir des résultats généralisables à plus de quelques méthodes d'enseignement seulement, étaient riches et prometteuses en termes de compréhension des processus d'apprentissage.

En développant leurs formulations respectives, cette partie *3. Cadre théorique et pratique* a montré que si la théorie anglo-saxonne du changement conceptuel était riche de plus de contributions et d'analyses de la part de la communauté scientifique que le modèle allostérique de l'apprendre francophone, ce dernier possédait plusieurs avantages théoriques forts, dont une nette avance en matière d'explicitation de la notion de *conception*, de compréhension des conditions nécessaires à leur transformation et à leur stabilité, et de formalisation des mécanismes correspondants.

Ce cadre théorique étant fixé, il devient opportun d'énoncer une problématisation plus aprofondie de notre travail. C'est ce qui fait l'objet de la partie suivante.

4. PROBLEMATIQUE

« Pour apprendre quoi que ce soit, commencer par y trouver un sens. »
Seymour Papert (1981), mathématicien, informaticien et éducateur américain.

4.1. Préambule

Après ce large état des lieux, revenons un instant à notre objectif général, qui consiste à élaborer, à partir de toutes les connaissances disponibles, *un modèle d'apprentissage utile pour le praticien dans les domaines de l'éducation, de la formation et de la communication*. Nous avons précisé ce que nous entendions par « modèle », en insistant sur l'importance des dimensions théorique et scientifique du terme. En matière « d'apprentissage », nous avons également mentionné plusieurs fois notre préférence pour la compréhension de l'acquisition de savoirs complexes, telles que ceux que l'on acquiert dans les cours de science, plutôt que de savoirs fondamentaux tels que le langage, l'arithmétique ou la lecture.

Par ailleurs, pour définir ce que nous entendons par « utile », nous reprenons à notre compte les quatre dimensions contribuant à la stabilité des conceptions dans la théorie du changement conceptuel : le modèle que nous cherchons à élaborer sera théorique et formel mais également *intelligible*. Il devra montrer son avantage sur les autres modèles en créant une *insatisfaction* pour les visions plus frustes de l'apprentissage. Il devra bien sûr être *plausible*, ce dont nous nous assurerons avec soin, mais surtout *fécond*. Fécond au sens d'*opératoire* d'une part : il devra permettre d'éclairer facilement n'importe quelle situation pédagogique, et ses applications directes devront être évidentes et faciles à mettre en œuvre. Mais nous le souhaitons également fécond d'un point de vue *intellectuel* : qu'il soit plus programmatique que normatif, plus stimulant que descriptif, et qu'il permette au praticien d'imaginer lui-même des applications originales à partir de la compréhension de l'apprentissage qu'il en retirera. Par « praticien », enfin, nous entendons l'ensemble des professions qui doivent faire preuve de pédagogie (enseignant, médiateur, médecin, journaliste, communiquant…) et à qui une meilleure compréhension des processus d'apprentissage peut être utile.

Dans cette problématique, nous entendons :

1. Rappeler pourquoi notre choix s'est porté sur le modèle allostérique de l'apprendre, notamment au regard des informations présentées dans la partie *2. Etat de la question*,
2. Formuler les termes exacts d'une problématique découlant directement des résultats développés dans la partie *3. Cadre théorique et pratique*,
3. Formuler nos hypothèses de recherche, destinées à répondre à cette problématique.

4.2. La piste de l'allostérie

Avant d'explorer les possibilités de sa formalisation, commençons par justifier notre choix d'un modèle didactique *phénoménologique* et *physicaliste* pour tenter de réaliser notre objectif, plutôt que d'un modèle *cognitif* et *réductionniste*.

4.2.1. Un modèle phénoménologique

Parce que le modèle allostérique s'appuie sur un concept qui n'a pas d'existence tangible (au sens de mesurable ou directement observable), la *conception*, il appartient aux *modèles phénoménologiques*, dans le sens où nous les décrivions au paragraphe *2.1.3.2.* D'une certaine manière en effet, il n'a pas

même besoin de reconnaître l'existence d'un cerveau tel que nous le connaissons : *tout se passe comme si* le savoir prenait appui sur des assemblages dynamiques de conceptions, placés dans un espace intérieur quelconque et, en vertu de la métaphore initiale, régis par des règles plus proches de celles qui animent les systèmes matériels que celles qui président au fonctionnement des automates.

Y a-t-il un intérêt à étudier un processus cognitif complexe tel que l'apprentissage à l'aide d'un modèle phénoménologique alors que les sciences cognitives ouvrent la voie de son étude réductionniste ? Ne faudrait-il pas faire au contraire porter les efforts vers une approche plus réductionniste de ces processus ? Nous ne le croyons pas, pour trois raisons déjà évoquées indépendamment plus haut. D'une part, les sciences cognitives ne fournissent pas encore suffisamment de résultats pour pouvoir déduire des applications pédagogiques de la description des processus d'apprentissage appliqués aux savoirs complexes. D'autre part, les modèles phénoménologiques sont souvent plus proches de la réalité observable (et c'est bien elle qui nous intéresse ici puisque l'objet central est l'éducation de l'élève et non son cerveau). Enfin, ils sont susceptibles de faire émerger des concepts qui, à leur tour, ouvrent des pistes pour l'approche par les neurosciences. Or l'un de nos objectifs généraux est justement de tenter de relier les approches des sciences de l'éducation et des sciences cognitives, en leur permettant de se nourrir l'une l'autre.

L'exemple du dialogue entre les neurosciences et la philosophie de l'esprit, à cet égard, nous encourage dans cette voie ; les conceptions semblent en effet appartenir au même registre descriptif (et en tout état de cause phénoménologique) que les *qualia* (au singulier *quale*), définis par Pacherie comme les « aspects phénoménaux de notre vie mentale »[43]. Elle écrit notamment : « *Je mords dans un citron, sens l'odeur de la rose, entends le son du violon, passe la main sur une surface rugueuse, ressens une violente douleur dans l'épaule, un chatouillement dans la paume de la main, vois une surface rouge vif, suis d'humeur mélancolique, sens monter une violente colère, etc. Dans chacun de ces cas, je me trouve dans un état mental doté d'un caractère subjectif spécifique. Être dans l'un de ces états me fait un effet particulier et l'effet que cela fait de sentir l'odeur de la rose n'est pas le même que de sentir l'odeur d'œufs pourris ou d'entendre le son de la trompette. Chacun a sa phénoménologie propre* ». Or les questions posées par la convergence entre cette description et la théorie des neurosciences sont extrêmement porteuses : « *Quels états mentaux ont des qualia ? Les qualia sont-ils des propriétés intrinsèques de leurs porteurs ? Quelles sont les relations entre les qualia et les propriétés représentationnelles des états mentaux ? Quelles sont les relations entre les qualia et le monde physique tant externe (l'environnement, le corps), qu'interne (le cerveau) ?* » Autant de questions qui sont notamment étudiées par imagerie cérébrale, et qui pourraient presque être appliquées telles quelles aux conceptions.

4.2.2. Un modèle physicaliste

Un autre choix à justifier est celui que nous allons faire dans le paragraphe *4.3.1. Possibilités de formalisation du modèle* consistant à rechercher une voie de formalisation des processus d'apprentissage dans la direction de l'analogie avec la réactivité chimique plutôt que dans celle, plus naturelle pour les sciences cognitives, des processus neuronaux. L'approche phénoménologique décrite plus haut l'autorise, mais qu'en est-il de sa pertinence ?

Nous croyons pouvoir accorder aux processus cognitifs une dualité épistémologiquement similaire à la dualité onde-corpuscule de la physique atomique : selon la manière dont on les observe (dont leur *affordance* s'exprime, diraient les philosophes de la chimie), les systèmes qui les sous-tendent apparaissent alternativement comme matériels (ou physiques : neurones, cartes corticales, aires cérébrales) et informationnels (ou cybernétiques : circuits neuronaux, chemins corticaux). De plus, nous l'avons vu, l'apprentissage peut aussi bien prendre la forme de transformations structurelles de la matière cérébrale que de modification des connexions régissant la manière dont l'information y est stockée.

---

[43] http://pacherie.free.fr/COURS/DEA/qualia.html - Dernière consultation le 05/02/2013.

Tout en conservant à l'esprit la dimension biologique du savoir, nous croyons donc pouvoir tenter de représenter ses transformations à l'aide d'un modèle physicaliste du traitement de l'information, sans trahir la nature de la pensée et des processus de son élaboration.

4.2.3. Un changement de point de vue

Enfin, l'élément fondamental sur lequel nous pensons pouvoir faire reposer la pertinence du développement de l'analogie allostérique consiste en un changement de point de vue particulièrement audacieux sur la notion de *conception*. Alors que dans une grande partie de la littérature des sciences de l'éducation la « représentation » est considérée comme une brique élémentaire du savoir relativement passive, plus proche du concept que de la structure cérébrale active, simplement structurante et dont le rôle de « grille d'analyse » n'est relevé que dans de rares cas, alors même que les schèmes de pensée ont davantage le rôle de filtres que de modes de raisonnement, nous considérons la *conception* comme une unité véritablement *active* dans le fonctionnement de la pensée, la perception du monde et le traitement de l'information. « L'espace des conceptions », comme nous le définirons, devient dynamique, actif, plastique, moteur même, et non plus seulement représentation, grille ou filtre.

Figure 34 : *Conceptions* et *cadres de référence*. *Le Chat* (Geluck, 1999).

4.3. Vers un modèle allostérique de l'apprendre formalisé

La convergence des théories éducatives, philosophiques et cognitives avec le modèle allostérique de l'apprendre nous semble encourageante au regard de la pertinence de notre recherche et de sa capacité à faire émerger une version de ce modèle qui soit à la fois formalisée, explicative, prédictive, interprétative, opératoire et intelligible pour les praticiens ainsi que, bien entendu, compatible avec les résultats des recherches menées sur la pensée.

Il reste toutefois à construire la démarche qui permettra de le construire et de le valider sur les plans théorique et expérimental. Pour ce faire, nous nous proposons successivement, à partir de la mise en évidence des limitations du modèle allostérique de 2002 :

1. D'explorer les possibilités de sa formalisation ;
2. De nous interroger sur la possibilité de déduire directement du modèle formalisé ainsi construit des applications pédagogiques telles que l'*environnement didactique* empirique de 2002 ;
3. De chercher une manière de le valider expérimentalement.

Ces analyses successives conduiront à la formulation de nos trois hypothèses de recherche, qui ouvriront elles-mêmes (dans la partie *5. Méthodologie*) sur la démarche employée pour les corroborer et/ou y répondre.

4.3.1. Possibilités de formalisation du modèle

Comme nous l'avons précisé un peu plus haut, le modèle de l'apprendre élaboré par Giordan est phénoménologique et physicaliste : qualifié d'*allostérique* parce qu'il évoque le fonctionnement de protéines possédant cette même propriété, il s'appuie sur des structures élémentaires qui n'ont pas d'existence réelle, les *conceptions*. Aussi, même si ces deux approches ne sont pas *a priori* incompatibles, nous ne tenterons pas de réorienter ce modèle vers la conceptualisation que les neurosciences font de la pensée, usant de circuits et de cartes neuronales ou d'aires cérébrales.

Au contraire, parce que le modèle allostérique de 2002 décrit l'apprentissage comme « *un processus dynamique de transformation du savoir, par déconstruction – reconstruction des structures de pensée préexistantes, sous l'influence de l'environnement de l'apprenant* »[44], nous pensons qu'il est possible de le formaliser en empruntant concepts et représentations à une autre branche des sciences expérimentales : la chimie physique et la biochimie.

La formulation employée ci-dessus pour décrire l'apprentissage est en effet extrêmement proche de celle qui décrit les transformations physico-chimiques de la matière. De plus, appliquées à des molécules aussi complexes que les protéines, elle permet d'utiliser les représentations de ces dernières pour illustrer toute la complexité des conceptions (en exploitant notamment leurs structures primaire, secondaire, tertiaire et quaternaire, mais aussi leurs sites actifs et leurs possibilités d'interaction avec le milieu extérieur), voire plus généralement la complexité de la pensée : en agençant diverses conceptions-protéines les unes par rapport aux autres, en les liants et en les faisant interagir, on peut visualiser les notions d'heuristiques (des *chemins de pensée* vers les *sites actifs* sièges du traitement de l'information), leur *inhibition* (une propriété courante dans le monde des macrobiomolécules) et les différents *étages* du savoir (y compris le socle des connaissances naïves sur lesquelles s'ancrent les conceptions nouvelles).

Mieux encore, la théorie de la réactivité chimique s'accompagne non seulement de représentations et de visualisations des objets qui interagissent, mais également de grandeurs représentant l'évolution des systèmes en évolution : énergies de liaison, courbes d'activation, stabilités relatives, entropie de réaction, encombrement stérique, catalyse… Autant de notions qui pourront être empruntées pour décrire, représenter et donner accès aux processus cérébraux lors des apprentissages.

Ce type de formalisation par emprunt à d'autres disciplines présente certes des risques et provoque légitimement la défiance : on a par exemple trop souvent à déplorer la transposition imprudente et totalement illégitime de la dualité onde-particule ou du principe d'incertitude de Heisenberg, conçus pour décrire des objets microscopiques, à des domaines macroscopiques, voire macrosociaux et macroéconomiques. Conscients de ces risques, nous prendrons plus loin, dans la partie *5. Méthodologie*, le soin de justifier notre approche et de l'inscrire dans un cadre bien délimité pour ne pas tomber dans ces travers.

4.3.2. Limites et perspectives de transformation du modèle allostérique de 2002

De manière générale, la consolidation théorique du modèle allostérique de l'apprendre doit permettre de répondre à plusieurs questions non résolues par le modèle empirique de 2002. Ce sont elles, dont certaines ont déjà été évoquées dans le paragraphe *3.3.5.2. Pertinence théorique et cohérence [du modèle allostérique]*, que nous nous proposons de développer ici.

4.3.2.1. Structure et socle du savoir

En premier lieu, la métaphore de l'iceberg est certes utile pour rendre compte de l'inaccessibilité de la plus grande partie d'une conception, mais l'aspect statique du bloc de glace et son incapacité à interagir avec d'autres icebergs ne permettent ni de rendre compte de l'aspect dynamique du savoir, ni

[44] Notes de cours personnelles, document interne.

des influences réciproques, constructives ou destructives, des conceptions entre elles. Pour ce faire, il sera nécessaire de changer de représentation ; fidèles à la métaphore initiale de l'allostérie, nous tenterons d'utiliser celle de la *protéine*, en montrant qu'elle présente les caractéristiques nécessaires.

Il nous faudra alors nous interroger sur la nature de ces interactions et sur la structure du savoir que constituent les assemblages dynamiques de conceptions ; une question non abordée dans le modèle empirique de 2002, faute de représentation adéquate. Ce faisant, il sera nécessaire de conserver à l'esprit les descriptions que font des processus cérébraux les neurosciences : pour être phénoménologique, un modèle de la pensée ne peut plus s'en affranchir pour autant. Le modèle empirique de 2002 n'établissant aucun lien avec les structures cérébrales, nous devrons notamment nous interroger sur le lien entre les *cortical maps* de Dehaene (Dehaene & Cohen, 2007 ; voir paragraphe *3.4.3.3. Cerveau, aires cérébrales et cartes corticales*) et les conceptions.

Enfin, la question du « support » (ou du socle) des premières conceptions devra être évoquée et, avec elle, celle des conceptions naïves chères aux psychologues cognitifs (Spelke *et al.*, 1999), mais aussi celle de la manière dont les conceptions nouvelles s'intègrent à ces savoirs natifs. La théorie du recyclage neuronal de Dehaene (Dehaene & Cohen, 2007) ne pourra pas non plus être éludée, tant elle a de répercussions sur la nature et la structure du savoir.

4.3.2.2. Processus cognitifs : conceptions et heuristiques

Si la question du traitement de l'information est toujours évoquée par Giordan *et al.*, lorsque la conception est considérée comme une « grille d'analyse » par exemple (Giordan & Pellaud, 2004), les descriptions de 2002 ne permettent pas de comprendre comment l'information est traitée, ni par « quoi ». Le recours à la métaphore de la protéine devrait permettre d'y répondre de deux manières différentes : en invoquant la notion de *site actif*, site réactionnel placé au cœur de la structure, puis celle d'*heuristique* (Kahneman, Slovic & Tversky, 1982), véritable *chemin de pensée* conduisant l'information vers le *site actif* où elle sera traitée.

Dans le modèle allostérique de 2002, les conceptions semblent très ancrées dans l'esprit des individus, voire préexister à leur utilisation dans une situation donnée. Cet implicite nous semble contestable, au regard notamment du *modèle-cadre SRK* (Rasmussen, 1983) qui induit l'idée qu'il est certes possible que conceptions et heuristiques préexistent et soient sollicitées par l'individu lorsqu'il en a besoin, mais qu'elles soient également dans certains cas recyclées et dévoyées, voire élaborées spécifiquement pour l'occasion.[45] Par ailleurs, ne disposant pas de la notion d'heuristique, le modèle empirique de 2002 n'établit pas de différence entre l'utilisation d'une mauvaise conception dans le cadre d'une approche raisonnée (qualifiée de *système 2* de Stanovich & West, 2000) et l'usage spontané d'une mauvaise heuristique par réflexe de pensée (*système 1*).[46]

4.3.2.3. Accessibilité et inhibition des heuristiques

Par ailleurs, plusieurs éléments nous conduisent à la nécessité d'affiner cette représentation, et notamment la question de l'*accessibilité* de Higgins (1996) chère à Kahneman, l'existence des « plis cognitifs » décrits par Houdé (1999) et les récents résultats sur l'inhibition obtenus par imagerie cérébrale (Houdé & Tzourio-Mazoyer, 2003 ; Moutier *et al.*, 2006 ; Leroux *et al.*, 2006, Daurignac *et al.*, 2006). Car il nous faut à la fois comprendre la *prééminence* de certaines heuristiques, et l'impossibilité d'en exploiter certaines autres alors qu'elles existent dans l'espace des conceptions.

Dans un premier temps, il pourra être intéressant de tenter de caractériser cette *prééminence* en rendant compte de l'*accessibilité* et/ou de la *disponibilité* d'une heuristique donnée. Là encore la

---

45 Cette hypothèse sera confirmée par notre recherche expérimentale sur les expériences contre-intuitives.

46 Un défaut que nous mettrons en évidence et corrigerons par le truchement d'une expérience simple décrite dans la section *6.3.2. Chemins de pensée et heuristiques*.

métaphore de l'allostérie devrait pouvoir être exploitée pour décrire les effets de *contexte*, et être explicitée par le recours aux formalismes de la biochimie. En effet, ces problématiques se retrouvent telles quelles dans les protéines allostériques comme l'hémoglobine, dont les hèmes présentent à la fois des accessibilités conformationnelles variables en fonction du nombre de sites déjà occupés par des molécules de dioxygène, et des disponibilités modifiables en fonction de la présence d'inhibiteurs tels que la molécule de monoxyde de carbone ou l'ion hydronium. La *rémanence* de certaines heuristiques, liée à leur usage récent par un individu, pourra également être étudiée comme l'un des avatars des trois heuristiques de Tversky et Kahnemman (1974).

Mais pour l'enseignant soucieux de contrôler les processus cognitifs de l'élève pour faciliter ses apprentissages, la question fondamentale consistera surtout à lui permettre d'apprendre à « choisir » les « bonnes » heuristiques, et à inhiber les « mauvaises ».

4.3.2.4. Conceptions de contrôle (reconnaissance et orientation)

Une notion manquante dans la description du modèle empirique de 2002, bien qu'elle soit sous-entendue dans l'idée de *métacognition*, est en effet celle de conceptions régissant les conditions d'application d'autres conceptions. diSessa (1993) a évoqué cette question à travers la notion de *p-prims* particulières, dont le rôle est de servir à l'activation spécifique d'autres *p-prims*.

Pour notre part, nous préférons continuer à utiliser le terme de conception, mais force est de constater qu'il nous faudra en distinguer deux catégories, notamment en situation raisonnée (*système 2*) : un premier niveau de conceptions devra être imaginé comme étant responsable de l'orientation de la pensée vers un second niveau qui traite l'information, telles que les protéines sur la membrane d'une cellule qui agissent comme des capteurs sensibles. Une idée que conforte Andler (2008) en écrivant : « *Les élèves sont équipés de préconceptions extrêmement résistantes, consistant en systèmes organisés de concepts et de croyances délimitant leur usage, et l'enseignement doit chercher à mobiliser ces préconceptions pour les faire évoluer, plutôt qu'à faire comme si elles n'existaient pas* ». On retrouve là l'idée « d'écologie conceptuelle », de Posner *et al.* (1982), mais caractérisée de manière plus précise.

4.3.2.5. Transformations du savoir

Une fois décrite la structure du savoir, il faudra s'intéresser à ses transformations, c'est-à-dire aux processus d'apprentissage. Mais si, par rapport à la théorie du changement conceptuel de Posner *et al.*, la grande force du modèle allostérique est de caractériser le « changement » comme un processus de transformation par « déconstruction-reconstruction » plutôt que comme un « échange », il donne peu d'indications sur la nature de cette transformation et sur les mécanismes par lesquels opère la « déconstruction » .

Par ailleurs, une conception erronée dans une situation donnée peut très bien s'avérer pertinente face à un problème différent. Que signifie alors « transformer ses conceptions » ? S'agit-il d'effacer les traces de la conception initiale dans le système cognitif de l'apprenant ? De l'enfouir profondément pour en interdire l'accès et l'utilisation ultérieure ? De la mettre en quarantaine, au cas où elle pourrait tout de même encore servir ? Ce qu'il s'agit de déconstruire dans ces cas-là, ce sont apparemment davantage les règles d'utilisation de la conception que la conception elle-même ; ou plus en amont, l'organisation des heuristiques sollicitées lors de la résolution d'un problème.[47]

A ce stade, il ne devrait donc plus être nécessaire de se limiter à l'existence d'une seule conception, d'une seule heuristique à l'égard d'une situation ou d'une information donnée ; la coexistence de plusieurs heuristiques en concurrence, qu'elles soient préexistantes, détournées de leur usage premier ou construites *ab initio*, sera envisageable. Il faudra donc probablement *redéfinir l'apprendre*, non plus uniquement comme un processus de déconstruction-reconstruction d'une conception, mais comme

[47] C'est ce que nous verrons dans le paragraphe *6.3.2.3. L'expérience du croissant de Lune*.

toute une série de processus de natures diverses : construction ou modification structurelle d'une conception ou d'un groupe de conceptions, aménagement, désinhibition ou inhibition d'heuristiques, assouplissement ou renforcement d'assemblages de conceptions…[48]

Conservant l'idée originelle qu'il est possible de considérer l'apprendre comme une succession d'étapes élémentaires permettant de passer par différents états de savoir caractérisables, une question fondamentale à résoudre sera dès lors celle de la difficulté du passage d'un état de savoir à un autre. Grâce au formalisme de la réactivité chimique, la notion d'*activation* devrait assez naturellement pouvoir expliciter l'effort à fournir dans n'importe lequel des processus évoqués ci-dessus.

En effet, il nous faudra montrer que l'étape élémentaire de tout apprentissage peut être considérée comme un cheminement individuel réductible au franchissement d'une *barrière d'activation* entre deux états de savoir *via* un « état de transition » dont la nature et la structure peuvent être décrites de la même manière que les autres états de savoir. La notion d'entropie d'activation pourra alors être introduite, explicitant une dimension inédite des processus d'apprentissage, avant qu'on ne tente de comprendre l'éventuelle signification de la notion d'*enthalpie libre d'activation*. Une approche qui nécessitera toutefois l'appui d'une modélisation graphique explicite.

4.3.2.6. Formalisation et représentation

Dans une perspective de formalisation des mécanismes de la pensée, il pourrait ainsi être utile de représenter le traitement cognitif de l'information, et notamment le choix d'heuristiques particulières (menant éventuellement à des conceptions inadaptées), comme la progression d'un système sur une hypersurface, progression qui serait liée à l'optimisation d'une fonction représentative des caractéristiques de l'interaction entre une information donnée et l'espace des conceptions d'un individu. Dans ce cadre, il serait pertinent de distinguer deux types de fonctions.

La première décrirait les interactions entre une information et un savoir figé, comme cela se produit dans le mode S du modèle SRK, permettant de visualiser les raisons pour lesquelles on peut, dans certains cas, fournir des réponses inadaptées à des problèmes pour lesquels on dispose pourtant des conceptions adéquates (comme dans l'exemple de la batte et de la balle de base-ball décrite dans le paragraphe *3.4.3.5. Les chemins de pensée et le modèle-cadre SRK*). La théorie de la réactivité chimique pourra probablement fournir, à travers les idées d'*encombrement stérique* et de *souplesse entropique*, des concepts propres à formaliser ces différentes raisons. On pourra alors tenter de retrouver les « plis cognitifs » de Houdé dans les plis de l'hypersurface représentative de cette fonction.

La seconde fonction serait reliée aux déstabilisations liées à la réorganisation du savoir en mode R ou K. Elle pourrait probablement préfigurer une fonction utile pour la représentation des processus d'apprentissage, tout en permettant de poser de manière formelle la question des moyens de la transformation du savoir et les raisons de la stabilité des conceptions.

4.3.2.7. Stabilité et robustesse des conceptions

Pour comprendre la *prééminence* de telle ou telle conception, on peut certes raisonner comme plus haut en termes d'accessibilité et de disponibilité de l'heuristique qui y mène Nous verrons que pour l'éducation, ce point de vue sera surtout pertinent en situation de stress, c'est-à-dire lorsque des décisions doivent être prises ou des réponses données rapidement, ce qui correspond à ce que les chimistes nomment « contrôle cinétique » dans la théorie de la réactivité chimique. Mais c'est surtout en raisonnant en termes de s*tabilité* (absolue ou différentielle) que l'on pourra rendre compte de la *survivance* (ou *persistance*) des conceptions et des assemblages qu'elles constituent.

Grâce au bagage conceptuel de la théorie de la réactivité chimique et par l'emploi de la deuxième

[48] Ce que nous ferons dans les paragraphes *6.4.1.2. Retour sur le modèle allostérique* et *6.4.2.2. Première typologie des processus d'apprentissage*.

fonction introduite ci-dessus, il sera ainsi probablement utile d'introduire une description plus thermodynamique du savoir, décrivant les *stabilités structurelles* respectives des conceptions et des heuristiques associées, élaborées par l'individu depuis l'enfance. Cette notion de *stabilité*, dont il conviendra de chercher la signification mais qui pourra rassembler des aspects énergétiques et entropiques, pourra représenter la robustesse des *conceptions*, constituée de son côté et respectivement par leur *solidité* et leur *souplesse*.

Il restera à rechercher les paramètres qui régissent la stabilité des conceptions, de manière à comprendre ensuite pourquoi, en dépit de leurs apprentissages, nombreux sont les cas où les élèves reviennent à leurs anciennes conceptions.

4.3.2.8. Contrôles péricognitifs

Dans ses derniers développements du modèle allostérique (Giordan *et al.*, 2010), Giordan précise l'importance des niveaux infracognitif, métacognitif, intentionnel et émotionnel (ou affectif) en plus du strict niveau cognitif. Dans Lagger *et al.* (2008) par exemple, la figure 35 décrit ces niveaux lorsqu'ils sont appliqués à l'éducation thérapeutique du patient ; y apparaît en outre, à la place du niveau intentionnel, le niveau perceptif.

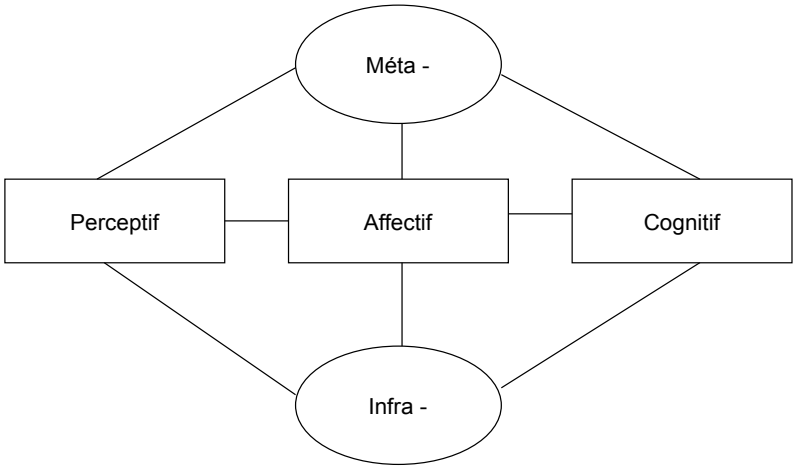


Figure 35 : Différents niveaux d'apprentissage dans l'éducation thérapeutique du patient (Lagger *et al.*, 2008)[49].

Andler écrit quant à lui (2008) : « *Les états et processus conscients doivent être expliqués dans un cadre beaucoup plus large, comprenant des états et processus non conscients porteurs de contenus qui ne s'expriment pas nécessairement dans un « langage » intelligible par le sujet conscient. C'est en cela que la psychologie cognitive se démarque d'entrée de jeu de la psychologie commune ou spontanée* ».

Dans notre version formalisée, l'ensemble de ces différents niveaux devra être traité, tant les différents types d'apprentissage ne sauraient être réduits à des paramètres cognitifs purement objectifs et rationnels. La critique en a été faite aux théories du changement conceptuel, et c'est un écueil qu'il faudra nécessairement faire surmonter au modèle allostérique.

Nous prévoyons d'ores et déjà que ces contrôles péricognitifs apparaîtront dans les facteurs circonstanciels qui moduleront l'accessibilité et la stabilité structurelle évoquées plus haut, agissant selon la manière dont l'individu les exerce, consciemment ou inconsciemment, sur son propre savoir.

L'ensemble des éléments développés dans cette section 4.3.2. devra finalement conduire à autant de pistes possibles pour faciliter les apprentissages, faisant du modèle allostérique un outil prédictif et interprétatif performant et justifiant entre autres la perspective de retrouver et d'enrichir

[49] Proposé par Giordan en 2007 à Bobigny dans son cours d'Education thérapeutique du Patient – document interne LDES.

l'environnement didactique de 2002 à partir de l'approche théorique ainsi élaborée. Enfin, le degré de réussite de l'entreprise consistant à rendre compte des processus d'apprentissage par le biais de l'analogie allostérique devra être évalué : de lui dépendra en effet la validité de toute l'étude.

4.3.3. La nécessité d'applications pédagogiques directes

4.3.3.1. Formaliser pour pouvoir prédire

Comme nous l'avons signalé au paragraphe *3.3.5.2. Pertinence théorique et cohérence*, la distinction entre le modèle et ses applications (pédagogiques) n'est pas bien explicitée dans la formulation de 2002. Conçu à l'intention des praticiens, le « modèle allostérique » est surtout présenté à travers cet environnement didactique, sans toutefois que ce dernier ait pu être réellement déduit point par point du modèle, encore trop peu formalisé pour être à ce point prédictif. Un défaut de cohérence (sans pourtant que cela mette en doute sa pertinence) qui constitue une faiblesse de l'ensemble.

Retrouver l'environnement didactique par une démarche déductive à partir de la reconstruction théorique du modèle allostérique constituera dès lors un objectif fort de notre étude.

4.3.3.2. Objectifs : la construction de nouveaux environnements didactiques

Compte tenu du nombre de paramètres nouveaux introduits par le modèle formalisé, nous préférons parler d'environnements didactiques, au pluriel, correspondant chacun à la mise en œuvre des prédictions relatives à un pan théorique particulier. L'essentiel du travail devra donc consister à (re)présenter, sous une forme proche de celle de l'environnement didactique de 2002, les leviers sur lesquels il est possible d'agir pour faciliter un apprentissage. On peut en effet en attendre non seulement une validation *a posteriori* du modèle, si les prévisions concordent avec les préceptes empiriques de l'environnement didactique version 2002, mais également l'émergence de nouveaux leviers pédagogiques, ainsi que l'explicitation des réussites et des échecs de certaines pratiques pédagogiques. La démarche sera toutefois trop générale pour constituer une validation fine de ce modèle, ce qui nécessitera l'introduction d'une validation expérimentale ultérieure.

4.3.4. Validation expérimentale du modèle

4.3.4.1. La mise à l'épreuve plutôt que la preuve

Pour valider expérimentalement le modèle, deux approches sont théoriquement envisageables, mais une seulement est réalisable en pratique. La première consisterait à évaluer chacune de ses prédictions par une recherche ciblée sur plusieurs populations d'élèves d'âges différents. Compte tenu de la richesse des environnements didactiques que l'on peut prévoir d'en déduire, la tâche serait monumentale.

En s'inspirant des critères de scientificité issus de l'épistémologie, il est possible d'imaginer une démarche moins intuitive mais tout aussi performante, qui consiste non pas à le *prouver*, mais à l'*éprouver* par une recherche expérimentale portant sur certaines de ses prédictions les plus originales.

En d'autres termes, si le modèle allostérique prédit la possibilité de susciter un apprentissage de manière efficace avec un outil pédagogique donné, et qu'il prédit en outre les risques et les limites liés à l'utilisation de cet outil, une recherche de terrain destinée à infirmer ces prédictions constituera une bonne validation expérimentale de sa pertinence si la tentative de falsification échoue.

4.3.4.2. Choix de l'outil de falsification : l'expérience contre-intuitive

Nous nommons « expérience contre-intuitive » toute expérience qui produit un résultat inverse ou totalement différent de celui auquel on s'attend avant de la mettre en action (Eastes & Pellaud, 2004b). Elle est largement utilisée dans les situations les plus diverses, de la classe au musée de sciences (Eastes & Pellaud, 2004b). Ce n'est donc pas un outil pédagogique anecdotique et il offre de

nombreuses possibilités d'observations. Sa mise en œuvre dans une recherche de terrain est aisée, courte et les exemples très diversifiés. Parce qu'elle stimule la parole de l'apprenant en bousculant ses certitudes de manière souvent ludique, tout en suscitant sa curiosité, elle favorise l'expression de ses conceptions et constitue à ce titre un excellent outil de recherche didactique.

L'intérêt pédagogique et les conditions d'usage de l'expérience contre-intuitive devraient donc correspondre à un ensemble de prévisions majeures du modèle allostérique formalisé, mettant en œuvre un grand nombre de paramètres : perturbation, accessibilité des heuristiques, stabilité des conceptions, passage de l'état de transition, aspects émotionnels et métacognitifs… Il devrait ainsi être possible de prévoir, à partir du modèle uniquement, un large ensemble de caractéristiques didactiques de ce type d'expériences.

Dès lors, leur comparison avec les résultats de l'expérimentation didactique constitueront, pour notre étude, une approche particulièrement pertinente pour la mise à l'épreuve du modèle théorique.

4.4. Hypothèses de recherche

L'ensemble des considérations développées dans la partie *4. Problématique* nous amènent à formuler précisément les trois hypothèses recherche suivantes.

Hypothèse 1 : Il est possible de reformuler le modèle allostérique de l'apprendre en lui appliquant le formalisme de la réactivité chimique des protéines, sous une forme compatible avec les diverses théories de l'apprentissage et de la pensée. Il devrait alors en résulter des prolongements théoriques inédits et féconds en termes de compréhension des processus d'apprentissage.

Hypothèse 2: Ce modèle formalisé permet, par déduction directe des éléments théoriques ainsi construits, l'élaboration d'environnements didactiques compatibles avec les connaissances pédagogiques actuelles. Il permet d'en interpréter, d'en perfectionner certaines, voire d'en produire de nouvelles, inédites ou insuffisamment explicitées.

Hypothèse 3 : Le modèle allostérique de l'apprendre formalisé peut être éprouvé expérimentalement dans une démarche falsificationniste à partir d'une prédiction théorique originale du modèle, choisie pour sa facilité de mise en œuvre expérimentale et pour la richesse des observations pédagogiques qu'elle permet de réaliser.

La problématique posée, et synthétisée sous la forme de ces trois hypothèses, il convient de préciser à présent la méthodologie qui permettra de les corroborer ou de les infirmer, avant d'effectuer les théorisations et expérimentations correspondantes. C'est ce qui fait l'objet des parties suivantes.

5. METHODOLOGIE

« Avant de se faire maître d'école, on se fait mettre des colles. »

Frédéric Dard (1921-2000), écrivain français.

5.1. Principe général de l'étude

La démarche que nous nous proposons d'utiliser dans cette recherche transparaît déjà dans la partie précédente ; il convient toutefois de la préciser en distinguant ses grandes lignes méthodologiques.

La première étape du travail (*H1*) consiste en une formalisation du modèle allostérique de l'apprendre, à partir de sa formulation de 2002, par l'exploitation de la métaphore de l'allostérie et par le recours au formalisme de la réactivité chimique. En quelque sorte, il s'agit de transformer une métaphore en une analogie ; une démarche délicate qui devra être fondée avec rigueur (figure 36).

Le modèle théorique ainsi construit soulèvera de nouvelles questions et produira de premiers résultats en termes explicatifs des processus d'apprentissage. Ces éléments seront alors nourris par les autres théories et résultats expérimentaux relatifs à l'élaboration de la pensée. Les variantes de la théorie du changement conceptuel, décrites plus haut, seront plus particulièrement invoquées de par leur proximité avec le modèle allostérique. Les résultats des recherches actuelles de psychologie cognitive, parfois conduites avec l'appui des techniques d'imagerie cérébrale, seront à leur tour examinés. La méthodologie de cette étape d'élaboration et de mise en cohérence théorique sera donc essentiellement bibliographique.

La deuxième étape consistera en une première validation expérimentale du modèle dans sa généralité (*H2*) : à travers une démarche déductive consistant à actionner le modèle à la manière d'une application informatique, elle conduira à tout un ensemble d'applications pédagogiques (nommées *environnements didactiques*). Confrontés à l'environnement didactique de 2002, ces résultats seront alors soit confirmés, constituant alors une validation partielle du modèle formalisé, soit infirmés, ce qui invitera à le réaménager pour le rendre plus conforme aux observations, ainsi qu'à en montrer les limites.

L'ultime étape de la recherche (*H3*) est la mise à l'épreuve spécifique, dans ses moindres détails, d'une prédiction particulière du modèle (figure 37). Cette approche, complémentaire à la précédente, est nécessitée par le risque que le modèle construit soit seulement globalement et approximativement correct. Contrairement à l'étape précédente de *vérification*, il s'agira ici bien davantage d'une étape de *falsification* (Popper, 1935) du modèle ; littéralement, d'une mise à l'épreuve dans le détail par une tentative de *réfutation*.

5.2. Elaboration théorique (*Hypothèse 1*)

5.2.1. Approche épistémologique

5.2.1.1. L'allostérie : de la métaphore à l'analogie – Ecueils potentiels

Comment justifier le recours à des protéines, fussent-elles « allostériques », pour décrire les processus d'apprentissage, ainsi que leur formalisation par une théorie de la réactivité chimique dont les effets, s'ils ne sont pas absents des processus cognitifs, n'en constituent évidemment pas la bonne échelle de description ? Ne risque-t-on pas, par cette approche, de tomber dans la catégorie des impostures intellectuelles (Sokal & Bricmont, 1997) ?

Pour éviter cet écueil, la méthodologie ne peut se limiter à invoquer un modèle issu de la chimie théorique pour l'appliquer sans précaution à la description d'un processus relevant de phénomènes fondamentalement différents, sous prétexte d'une métaphore initiale séduisante (l'allostérie).

Notre approche consiste au contraire à nous inspirer d'une démarche intellectuelle issue de la chimie pour traiter une question qui se présente sous des formes analogues. Ce dernier terme doit être considéré dans son sens le plus dur : la méthodologie appliquée à la première hypothèse de recherche devra permettre de fonder en tous points l'analogie issue de la métaphore initiale. L'encadré ci-dessous propose une explicitation de la différence entre métaphore et analogie.

DE LA METAPHORE A L'ANALOGIE

La *métaphore* est une image que l'on évoque pour faire ressentir un phénomène complexe à un tiers, voire pour mieux se le figurer soi-même. Elle n'est pas explicative, seulement figurative. Ainsi, parce qu'elle ne repose sur aucun fondement rigoureux, la démarche qui consiste à « filer la métaphore » (c'est-à-dire à en « déduire » que le système considéré et l'image utilisée pour le représenter auront des comportements semblables) est en général dangereuse.

En revanche, *l'analogie* consiste en la mise en évidence de propriétés similaires entre deux systèmes différents. Des propriétés susceptibles d'être exprimées par des lois semblables, s'appliquant à des concepts semblables.

Entre métaphore fausse et analogie parfaite, il existe certes un *continuum* au sein duquel il appartient à celui qui en fait usage de savoir se situer de manière à préciser les limites du rapprochement effectué.[50]

Une approche possible consiste à montrer que les deux systèmes étudiés (en l'occurrence les processus d'apprentissage et la réactivité des protéines) peuvent être décrits de la même manière dans un certain domaine qui constituera ensuite le domaine de validité de l'analogie, ce que nous ferons dans la sous-partie *6.1. Validité et légitimité de l'analogie*. Comme nous l'avons vu dans la section *4.3.1. Possibilités de formalisation du modèle*, le modèle allostérique de 2002 donne en effet de l'apprentissage une description très analogue à celle des transformations physico-chimiques de la matière.

Dans un second temps, il est nécessaire de définir, dans le cas analogue, des concepts décrivant des objets ou grandeurs susceptibles des mêmes comportements ; c'est par exemple le cas des conceptions à l'égard des protéines ou des schèmes à l'égard des assemblages de protéines d'une part, et des notions de solidité et de souplesse des heuristiques à l'égard des notions d'enthalpie et d'entropie issues de la chimie d'autre part.

Une fois les bases des deux modèles construites sur des descriptions analogues, des concepts semblables et des lois décrivant des comportements similaires, il devient possible de laisser le modèle ayant servi de source d'inspiration guider l'exploration du système à décrire. En d'autres termes, il ne s'agit plus alors de *filer la métaphore*, mais de *développer l'analogie*. Sans omettre de vérifier à chaque étape si les produits théoriques de l'analogie sont bien conformes à la réalité, ce qui est fait dans nos autres hypothèses de recherche.

5.2.1.2. Les concepts transversaux

Une seconde justification de la démarche employée réside dans l'existence de *concepts transversaux* applicables sous différentes formes à des champs variés de la connaissance (Fourez, 2003). Aussi le concept d'énergie est-il utile aux thermiciens autant qu'aux biochimistes, aux pétroliers et aux acupuncteurs. La théorie mémétique (Dawkins, 1989) donne un autre exemple de ces concepts transversaux, en établissant une analogie forte entre propagation des *mèmes* et transmission des *gènes*.

[50] On ne pourra pas, par exemple, déduire des oscillations de la réaction de Belousov-Zabotinski le fait que le système chimique correspondant se comporte comme un ressort en régime pseudo-périodique, car la comparaison n'est fondée que sur la comparaison d'une seule caractéristique. On préférera plutôt l'analogie entre les oscillations chimiques et celles de l'échappement d'un mécanisme d'horlogerie, mu par la détente progressive et continue d'un ressort. Mieux connue est l'analogie entre le comportement d'un courant laminaire en mécanique des fluides et celui d'un champ électrique en électromagnétisme ; deux phénomènes qui, dans certaines conditions, sont tous deux régis par les équations de Poisson ou de d'Alembert, par le biais de grandeurs elles-aussi analogues : le potentiel électrique et le potentiel vecteur.

Pour tirer parti de la force de la formalisation propre aux sciences dites « dures », il est en effet pertinent d'y chercher concepts et modèles théoriques transposables *analogiquement* à notre problématique. Mais en conservant en la matière une rigueur extrême, gardant à l'esprit qu'il n'est pas question d'extraire, de détourner et de corrompre des lois spécifiques issues des systèmes théoriques élaborés ailleurs ; il ne s'agit au contraire que d'utiliser simplement des principes universels et transversaux, que des sciences formalisées ont révélés et exploités dans leurs propres champs d'applications.

5.2.2. Corpus théorique en sciences cognitives et philosophie des sciences

Ce corpus a été largement développé dans la section *3.4.3. Apports théoriques*. Nous explicitons toutefois ici les principales sources qui serviront à la construction et à l'enrichissement du modèle.

Pour décrire la structure du savoir, le modèle allostérique de 2002 fournit la brique élémentaire (la conception), qui doit toutefois être complétée par la question du « support » des premières conceptions et des premières aptitudes du nourrisson. On invoquera pour ce faire, outre les travaux de Giordan, ceux de Wynn, Spelke, Dehaene *et al.* sur les compétences naïves et sur la théorie du recyclage neuronal.

Très liée au sujet précédent, la question du traitement de l'information par le système cognitif individuel sera largement enrichie par les travaux de Khaneman & Tversky puisqu'ils nous permettront d'introduire la notion de chemin de pensée ou *heuristique*, inexistante dans le modèle allostérique de 2002. Cette approche sera complétée par celle de Rasmussen, qui offre une catégorisation précieuse des différents régimes de traitement de l'information, elle aussi fondée sur l'observation, ainsi que par celle de Stanocich et West, reposant sur les notions de systèmes 1 et 2.

De ces notions découlera la nécessité d'aborder la question de l'inhibition cérébrale, et de son rôle dans l'apprentissage, en invoquant notamment les travaux de Houdé. Mais la source principale que nous invoquerons pour construire la version théorique du modèle allostérique sera la *théorie du changement conceptuel* (Posner, Duit, Treagust *et al.*), dont notre travail se rapproche le plus dans sa forme théorique et son inspiration phénoménologique. Elle pourra être rapprochée de l'idée de plasticité cérébrale développée dans les travaux de Frackowiak ou Pinker.

Enfin, les questions de stabilité et de robustesse des conceptions seront développées selon un point de vue largement personnel, en s'inspirant de l'ensemble des sources précédentes. La notion d'*accessibilité* de Higgins sera en outre utile pour éclairer les processus de transformation des conceptions et des heuristiques, éclairée par les notions de conceptions de contrôle (reconnaissance et orientation) que nous inspireront les p-prims de diSessa.

Comme sa version de 2002 et la théorie du changement conceptuel initiale, le modèle allostérique formalisé s'inscrira dans les paradigmes épistémologiques que constituent les travaux de Kuhn et Bachelard. Enfin, l'ensemble de l'édifice s'appuiera sur la théorie de la réactivité chimique. Celle-ci repose sur la *théorie de l'état de transition* (ou *théorie du complexe activé*) publiée simultanément par Eyring (1935), Evans et Polanyi (1935), sur la base de la statistique de Boltzmann, qui constitue depuis lors le paradigme dominant de l'interprétation des transformations de la matière en chimie.

5.3. Développements pratiquers et prévisions du modèle (*Hypothèse 2*)

Dans le traitement de cette deuxième hypothèse de recherche, les prévisions pédagogiques du modèle seront essentiellement explicitées sous la forme de conceptogrammes, sur le modèle de l'environnement didactique de 2002. Un plus grand nombre de niveaux hiérarchiques sera toutefois nécessaire :

- le premier niveau précisera les paramètres théoriques concernés (ex : *abaisser la barrière d'activation…*) ;

- le second niveau précisera les moyens d'agir sur eux (ex : *déstabiliser la conception initiale, stabiliser l'état de transition…*) ;
- le troisième niveau traduira les éléments du second en langage pédagogique du point de vue de l'élève (ex. *remettre en question son système explicatif…*) ;
- le quatrième niveau explicitera les éléments du troisième en termes d'actions à effectuer par l'enseignant (ex. *proposer à l'élève une expérience contre-intuitive, le rassurer après sa mise en œuvre…*).

L'intérêt de cette présentation réside dans l'éclatement des différents types de prévisions, qui permet d'une part de suivre la manière dont les caractéristiques théoriques sont transformées en indications pédagogiques, et d'autre part de réaliser leur évaluation individuelle, à la lumière de l'environnement didactique initial d'une part, mais également de ce qu'elles permettent de dire et de prédire quant à l'efficacité en termes d'apprentissage d'un outil pédagogique particulier : l'expérience contre-intuitive, qui sera en outre utilisée dans la recherche expérimentale ultérieure.

5.4. Validation expérimentale (*Hypothèse 3*)

Pour mettre à l'épreuve spécifiquement les prévisions théoriques du modèle, l'expérience que nous imaginons n'en porte pas moins sur des situations d'apprentissage réelles. La recherche s'inspire par suite largement de celles qui peuvent être menées dans un cadre scolaire ou, d'une manière plus générale, de médiation scientifique.

5.4.1. Support expérimental de la recherche

S'inspirant d'une activité de médiation scientifique originale de l'association *Les Atomes Crochus*[51], la recherche exploite un atelier de 10 expériences contre-intuitives, présentées sous forme de défis expérimentaux à relever, dont les explicitations relèvent des sciences physiques.

5.4.1.1. Description de l'activité

Chacune de ces expériences se déroule dans une loge ou un « coin atelier », placé à l'abri des regards. Le participant, muni d'une feuille de route, y découvre la nouvelle intrigue, présentée sous forme de question ou d'instruction, ainsi qu'un certain nombre d'objets simples offrant des possibilités d'expérimentation.

Il accède seul aux expériences lorsque l'atelier est présenté au « grand public », mais en binôme en situation scolaire, de manière à favoriser alors l'échange entre les élèves. A la fin de la séance, toutes les expériences sont reprises et discutées par l'animateur, avec l'ensemble des participants.

5.4.1.2. Nature des expériences

Cinq expériences, sur les 10 utilisées dans l'atelier, feront l'objet d'une attention particulière lors de la recherche exposée plus loin. Elles seront choisies : 1/ pour leur facilité de mise en œuvre (matériel simple, courant et robuste, reproductibilité…), 2/ pour leur intérêt pédagogique (formulation claire du défi, compréhension du phénomène accessible), 3/ pour leur intérêt didactique (forte contre-intuitivité, grand nombre d'interprétations possibles…), et 4/ leur diversité (autant au niveau des phénomènes que du matériel mis en jeu). Elles sont décrites dans l'encadré suivant.

[51] L'atelier des expériences… impossibles ? est né en 2002 de l'enrichissement, par le concept d'expérience contre-intuitive développé par *Les Atomes Crochus*, d'un atelier présenté par le LDES dans le cadre de la mini U (Université de Genève) lors de la *Nuit de la Science* du Musée d'Histoire des Sciences de la ville de Genève.

Chaud ou froid ? (chaleur et température) : Dans ce défi, la question consiste à déterminer à l'aide du thermomètre lequel des deux objets (boule d'aluminium et chaussette de laine) possède la température la plus élevée.

La course des balles (chute des corps) : une boule de pétanque et une balle de tennis sont lâchées en même temps à une hauteur de 2 m environ dans un air immobile. Le défi consiste à déterminer celle qui atteind le sol la première.

Le ludion[52] (compressibilité des gaz, incompressibilité des liquides et poussée d'Archimède) : un « ludion » (objet tubulaire creux et ouvert dans sa partie inférieure, généralement lesté) est placé dans une bouteille en plastique transparente. Il affleure, juste sous le bouchon fermé. Le défi consiste à trouver le moyen de le faire « couler » jusqu'au fond de la bouteille sans l'ouvrir ni la retourner.

Les feuilles amoureuses (effet Venturi) : un sèche-cheveux dont l'embouchure est ajustée sur un disque de carton évidé est présenté à l'élève. Le défi consiste à soulever un disque de papier cartonné de même taille (mais non percé) sans le toucher avec les mains.

La « ségrégation » (milieux granulaires) : Il s'agit ici de séparer plusieurs types de grains placés dans un récipient fermé (pois chiches, grains de poivre et sable).

Le tableau 5 précise les formulations de ces expériences dans l'atelier, ainsi que le matériel correspondant mis à disposition.

Expérience	***Formulation***	***Matériel***
Chaud ou froid ?	*Si tu mesures la température de cette pelote de laine et de cette boule d'aluminium, quel résultat obtiens-tu ?*	Un thermomètre à affichage digital (gradué au degré), une chaussette de laine repliée sur elle-même, une feuille d'aluminium sous la forme d'une boule de taille similaire. Les deux boules sont fixées sur la table.
La course des balles	*De la balle de tennis et de la boule de pétanque, laquelle tombe le plus vite ?*	Une boule de pétanque, une balle de tennis en mousse, un cageot molletonné pour les réceptionner, une chaise permettant de les lâcher d'une hauteur de 2 m environ.
Le ludion	*Sans ouvrir la bouteille mise à ta disposition, essaie de faire descendre l'objet qui se trouve à l'intérieur.*	Le récipient contenant le « ludion », petite pipette ouverte en sa partie inférieure et légèrement lestée, une seringue (sans aiguille) afin de pouvoir observer l'existence de l'air et sa compressibilité.
Les feuilles amoureuses	*A l'aide du sèche-cheveux à ta disposition, peux-tu soulever le disque en carton posé sur la table sans utiliser tes mains ?*	Un cercle de carton léger et un sèche-cheveux « habillé » d'un disque de carton similaire au premier, sur lequel sont fixés trois trombones (pour éviter que le carton ne « glisse » sur l'autre).
La « ségrégation »	*Sauras-tu trouver un moyen, sans ouvrir le bocal, de mélanger les trois types de grains qui s'y trouvent ? De les séparer ?*	Un bocal fermé contenant des pois chiches, des grains de poivre noir et du sable.

Tableau 5 : Formulation des questions présentant les expériences contre-intuitives et matériel à disposition.

[52] Cette expérience a déjà été décrite dans la section *6.6.5. Un effet « template »*.

Les notions scientifiques abordées, ainsi que l'origine du phénomène de contre-intuitivité sont par ailleurs résumées dans le tableau 6.

Expérience	***Notions scientifiques abordées***	***Contre-intuitivité***	***Interprétation***
Chaud ou froid ?	La notion de température ambiante	La température de la laine n'est pas plus élevée que celle de l'aluminium, bien qu'on en fasse des pulls pour l'hiver.	Parce qu'ils baignent dans le même environnement, les deux objets en prennent la température. Leurs couleurs sombres et l'absence de rayonnement puissant rend par ailleurs négligeable un éventuel effet d'absorption des infrarouges.
La course des balles	Le principe fondamental de la dynamique (expérience de Galilée)	Contre toute attente (et à l'inverse des observations courantes), les deux balles touchent le sol au même moment.	La balle la plus lourde est aussi celle qui se met en mouvement le plus difficilement (on parle d'inertie). La physique peut montrer que les deux effets se compensent exactement dans le cas d'une chute libre où la résistance de l'air est négligeable (ce qui est le cas ici car la hauteur de chute est faible et les balles petites).
Le ludion	La compressibilité des fluides et la poussée d'Archimède	De manière inattendue, le ludion descend dans la bouteille dès qu'on exerce une pression sur cette dernière.	Lorsque la pression augmente dans le dispositif, l'air contenu en haut du ludion se comprime, permettant l'entrée de l'eau. Le ludion s'alourdit alors de plus en plus, pour finir par couler lorsque son poids atteint celui du volume d'eau qu'il occupe. L'air situé en haut de la bouteille se comprime également, mais sans effet sur le ludion. La présence de bulles s'explique par le dégazage de l'eau, sous l'influence de la chaleur de la pièce.
Les feuilles amoureuses	L'effet Venturi	Paradoxalement, les deux disques se collent l'un à l'autre lorsqu'on les rapproche, en dépit du souffle du sèche-cheveux qui tend à les dissocier.	Lorsque l'air s'échappe avec suffisamment de vitesse, de manière radiale, entre les deux disques, il n'a « plus le temps » d'exercer de pression dans la dimension transverse à son mouvement ; l'air immobile placé de l'autre côté des disques possède donc une pression plus forte, qui les maintient plaqués l'un contre l'autre en dépit du flux d'air qui aurait tendance à les séparer.
La « ségrégation »	La ségrégation dans les milieux granulaires	Lorsqu'on secoue le bocal, les grains se séparent au lieu de se mélanger comme le feraient des liquides.	Lorsqu'ils se meuvent les uns par rapport aux autres, les petits grains peuvent se glisser entre les gros. Quelle que soit leur masse volumique, ils finissent par former une couche inférieure,

5.4.1.3. Etat d'esprit

Dans l'ensemble des expériences proposées dans ces ateliers, aucune réponse particul attendue. En revanche, il est demandé aux participants de justifier leur réponse, qu Dans l'expérience « La course des balles », par exemple, ils pensent toujours que l'une touchera le sol en premier (la plupart pense que c'est la boule de pétanque, mais u pensent que c'est la balle de tennis). Dans ce cas, il leur est demandé où sera la se première touchera le sol. Or les écarts prévus sont bien supérieurs à ce que l' observer ; c'est là que réside la contre-intuitivité. Mais si les adultes veulent invoquer l'air, les états de surface, libre à eux : la seule chose qui fera foi *in fine*, c'est ce qu'ils fois l'expérience réalisée. Car cet atelier des *Atomes Crochus* n'a pas été pensé po « résultat » de physique (généralement très anecdotique), mais bien plus pour ce permet de remettre en question au niveau des conceptions des participants.

5.4.2. Population

La population interrogée dans le cadre de notre recherche correspond à celle que vi d'enrichissement de la pédagogie des sciences, à savoir le « grand public » pour ce médiation scientifique d'une part, et les enfants et adolescents de niveaux primaire âgés de 8 à 15 ans, pour ce qui concerne l'enseignement d'autre part.

La notion de « grand public » implique que les personnes interrogées ne soient pa sujet traité. Bien que l'expérience montre (Eastes & Pellaud, 2004c) que certaines exp être aussi contre-intuitives pour les spécialistes que pour les profanes (et parfois m nous n'avons donc approché que des personnes n'ayant aucun lien direct connu av recherche ou l'enseignement des sciences expérimentales.

Par ailleurs, parce qu'une des finalités de l'exploitation pédagogique des expériences est l'introduction d'une *approche phénoménologique des sciences* (Eastes & Pellaud, 200 une compréhension des phénomènes chez les élèves en situation d'échec scolaire o classes concernées par notre recherche relèvent pour moitié de l'enseignement spécialis

5.4.3. Constitution du corpus

Pour ce qui concerne cette hypothèse de recherche, sur laquelle porte la expérimentale, et outre la littérature mentionnée dans la section *5.2.2. Corpus théo cognitives et philosophie des sciences*, l'essentiel de notre corpus sera constitué des r selon la procédure de « l'entretien didactique » proposée par Giordan & Martinand (1 situations distinctes : 1/ lors d'enquêtes individuelles enregistrées, qualitatives et diri situation de médiation scientifique auprès du « grand public » et 2/ grâce à des pré- et réalisés en binômes, toujours sous forme d'entretiens enregistrés dirigés et qualitatifs la mise en œuvre de l'atelier en situation scolaire. Ces situations seront réalisées su première lors d'une recherche préliminaire après l'établissement d'un diagnostic préa à l'élaboration du protocole, la seconde lors d'une recherche d'approfondissement figure 37).

5.4.3.1. L'entretien dirigé comme outil de recherche

L'expérience contre-intuitive étant susceptible de susciter les réactions les plus variée des conceptions les plus inédites, qui plus est dans les directions les plus impré chercheur, ce type de recherche nécessite l'utilisation d'un outil didactique approprié. l'entretien dirigé, approche familière au marketing et déjà utilisée dans les mu (Tobelem, 1992 ; Bitgood & Shettel, 1994), semble constituer une forme d'évaluation a

Dans cette procédure, bien que l'entretien soit mené sur la base de questions précises et suivant un ordre particulier, le chercheur, contrairement aux règles préconisées en psychologie sociale, ne se limite pas à une fonction de transcripteur. Il peut intervenir de façon active au cours de l'entretien en conviant son interlocuteur à fournir des explications relatives à ses réponses, afin d'approcher au plus près la façon de raisonner de l'individu, les implicites de son discours ainsi que les facteurs ou les éléments qui le conduisent à donner une certaine réponse (Giordan, Souchon & Cantor, 1993).

Cette méthode est également conseillée par Quivy et Van Campenhoudt (1988) pour recueillir les représentations des sujets questionnés. Selon eux, les entretiens permettent d'approfondir un sujet d'une façon plus nuancée que dans un questionnaire. La possibilité d'adaptation à chaque personne, que ce soit au niveau du langage ou de la formulation des questions, est également un des avantages de ce type de recueil d'informations. Nous nous sommes donc adaptées au niveau de langue des enfants, nous réservant la possibilité de demander des précisions lorsque la réponse n'était pas claire.

Les questions sont préparées à l'avance et posées l'une après l'autre, leur ordre étant important car certaines d'entre elles peuvent induire les réponses aux suivantes. La formulation de telles « questions à tiroir » (Maisonneuve & Margot-Duclot, 1963), stimulées par l'expérimentation et plus encore par l'observation de résultats inattendus (Eastes & Pellaud, 2004c), favorisent l'émergence des conceptions des personnes interrogées car elles les forcent à développer et à argumenter leur position et à préciser leurs propos. Bien que l'interviewé doive fournir une réponse précise pour chaque question posée, il est en effet convié à fournir des explications relatives à cette réponse, ce qui lui permet de s'exprimer de manière très libre et spontanée. De nombreux biais peuvent pourtant fausser les résultats de la recherche, les enfants ayant tendance à vouloir répondre « juste », c'est-à-dire pas toujours ce qu'ils pensent spontanément, pour faire plaisir à la maîtresse. C'est ce que Lamoureux (2000) appelle le phénomène de *désirabilité sociale*. L'intervieweur doit donc garder ses objectifs en vue tout en ayant un comportement le plus neutre possible, autant dans ses propos que dans son attitude. En contrepartie de ces inconvénients, la méthode permet d'obtenir des réponses exhaustives, mais néanmoins dirigées vers l'hypothèse de recherche que nous cherchons à étudier.

5.4.3.2. Choix de la méthode d'entretien

Les entretiens sont enregistrés sur dictaphone avec l'autorisation du participant, à qui l'on précise que « l'enregistrement est réalisé à des fins de recherche pédagogique » ; ils seront retranscrits plus tard mot pour mot, avant d'être analysés. Le choix de cette méthode s'est fait en fonction des critères suivants :

- Il a été signalé (Pellaud, 2000) que la vue d'un enregistreur, par son aspect formel et irréversible, pouvait bloquer certaines personnes. Le remplacement du magnétophone (dont la bande tourne inexorablement et pour lesquels les silences épuisent la bande disponible) par le dictaphone numérique (dont la capacité semble illimitée) est en l'occurrence propre à limiter le stress de l'interviewé en lui laissant prendre le temps de la réflexion (ce à quoi il est d'ailleurs toujours invité).
- L'expérience contre-intuitive, par les questions préalables qu'elle pose ou par les paradoxes apparents qu'elle soulève, suscite l'expression des conceptions les plus diverses à travers l'emprunt d'heuristiques souvent inadaptées (Eastes & Pellaud, 2004c). Ces errements spontanés sont fondamentaux pour notre recherche, ce qui justifie qu'ils soient capturés le plus précisément possible, ce qu'une retranscription directe permettrait plus difficilement.

Pour éviter que le stress de l'interview ne se rajoute à celui que procure la réalisation d'expériences souvent perturbantes, les sujets auront la possibilité de parcourir au moins trois autres expériences avant celle pour laquelle ils sont interviewés ; c'est ce qui justifie leur insertion dans un atelier complet de 10 expériences.

5.4.3.3. Du diagnostic préalable à la recherche d'approfondissement

Afin de permettre l'adéquation la meilleure entre la présentation d'un « savoir savant » (Sachot, 1996) et les conceptions des participants à l'atelier, une évaluation préalable (Borun, Massey & Lutter, 1994 ; Bitgood & Shettel, 1994) amenant à un diagnostic portant sur les intérêts, les conceptions, les questions et les réactions du public par rapport au propos (Guichard, 1990) s'avère indispensable, même si celle-ci ne permet qu'une approche approximative (Davallon & Triquet, 1993). Ce diagnostic peut alors conduire à la formulation de divers constats, qui permettent à leur tour de fixer les conditions méthodologiques d'une recherche préliminaire, confirmée par une recherche d'approfondissement. C'est l'approche que nous nous proposons de suivre dans la section suivante, *5.4.4. Elaboration du protocole de recherche*.

5.4.3.4. Choix du nombre d'expériences dépouillées

L'atelier dans lequel s'inscrit l'ensemble de la recherche compte 10 expériences, et nous avons indiqué plus haut que cette dernière ne porterait que sur 5 d'entre elles, choisies selon des critères spécifiques. Cette quantité d'expériences est potentiellement très largement suffisante pour le type de caractérisation que nous souhaitons réaliser. Aussi cela nous laissera-t-il la possibilité de ne traiter les données que de 4 d'entre elles au niveau de la recherche préliminaire, puis de 3 seulement dans la recherche d'approfondissement. Cette évolution décroissante nous permettra de négliger les expériences qui s'avèreront les moins significatives du point de vue des objectifs de la recherche.

5.4.4. Elaboration du protocole de recherche

5.4.4.1. Diagnostic préalable (2001)

Le diagnostic préalable a été conduit avant la phase expérimentale de falsification du modèle allostérique, au cours de séances d'animation de l'association *Les Atomes Crochus*. Grâce à des observations ponctuelles et de brefs entretiens avec les participants, il devait permettre de formuler des observations initiales destinées à comprendre, indépendamment de la théorie, les caractéristiques des expériences contre-intuitives en termes d'action sur les apprentissages. Ces observations initales avaient également pour but de rendre un peu plus concrètes les prédictions théoriques développées dans les sous-parties *7.5. Applications à l'expérience contre-intuitive* et *8.1. L'expérience contre-intuitive à travers la théorie allostérique – Prévisions théoriques*, par le biais de formulations simplifiées et plus intuitives.

Ces observations simplifiées seront restituées dans la section *8.2.1. Diagnostic préalable* mais par souci de clarté dans la description du protocole qui suit, où ces observations simplifiées sont plusieurs fois citées, nous les indiquons d'ores et déjà ici.[53] :

Observation 1 : Du point de vue de la recherche didactique, l'expérience contre-intuitive est un outil très performant pour faire émerger les conceptions des apprenants (préd. 1).

Observation 2 : Une expérience est rarement contre-intuitive dans l'absolu et « par nature ». Pour qu'elle le devienne, elle doit avant tout être adaptée au cadre de référence de l'apprenant (préd. 2).

Observation 3 : Pour pouvoir être qualifiée de contre-intuitive, une expérience nécessite un niveau de connaissances particulier pour pouvoir entrer en conflit avec certaines connaissances acquises (préd. 3).

Observation 4 : Une *mise en scène* est parfois nécessaire pour accroître, voire créer, l'effet de contre-intuitivité (préd. 4).

Observation 5 : Mais pour qu'une expérience soit réellement contre-intuitive pour un apprenant, il faut surtout que celui-ci ait eu la possibilité *d'anticiper* le résultat qui pourrait survenir (préd. 5).

---

[53] La parenthèse placée à la fin de chaque observation fait référence au numéro de la prédiction théorique à laquelle elle correspond dans la section *8.1.4. Synthèse des prédictions théoriques à vérifier*.

Observation 6 : Le questionnement préalable est insuffisant pour permettre à l'apprenant de dépasser ses conceptions et de donner une interprétation correcte du phénomène (préd. 6).

Observation 7 : Dans le cas où la contre-intuitivité s'exprime mais où le phénomène mis en œuvre n'est pas spontanément compris par l'apprenant, ce type d'expérience est en outre susceptible d'avoir divers effets néfastes sur l'apprentissage (préd. 7).

Observation 8 : Il est possible de formuler quelques conditions idéales de réalisation de l'expérience contre-intuitive, permettant d'exploiter ses caractéristiques pour conduire à un apprentissage réel et durable (préd. 8).

5.4.4.2. Recherche préliminaire (2002)

Pour vérifier ces prédictions et ainsi obtenir le cadre expérimental permettant de réaliser des entretiens pré-test/post-test ciblés sur la mise à l'épreuve des prédictions théoriques du modèle allostérique formalisé, une première recherche « grand public » a été menée. Les résultats préliminaires ainsi obtenus ont permis d'imaginer des améliorations à la fois au niveau de la forme et de la nature des entretiens, de manière à affiner la recherche de plusieurs manières différentes :

- La mise en œuvre des entretiens ayant conduit à l'identification des problèmes de compréhension de la part des personnes et élèves interrogées, les questions posées ont pu être reformulées en conséquence ;
- Cette première série de tests a fait émerger des caractéristiques inattendues, tant au niveau des conceptions des individus interrogés relatives aux phénomènes observés que des modalités de mise en œuvre des expériences contre-intuitives (notamment en termes de questionnement préalable et d'accompagnement). Ces nouveaux éléments ont par la suite pu être intégrés dans la recherche d'approfondissement.
- La multiplicité des caractéristiques observables ayant conduit à une grande dispersion des observations sur tous les cas possibles, la recherche préliminaire a également montré que, pour être significatives et conforter chaque observation par au moins trois observations cohérentes, les enquêtes devaient être plus ciblées (et donc le nombre de questions réduit).
- De fait, l'expérience relative à la ségrégation s'étant avérée moins riche que les autres (les résultats n'en auront pas même été dépouillés), elle sera abandonnée au profit des quatre autres, avec la perspective d'en abandonner une seconde après le pré-test de la recherche d'approfondissement pour cibler encore davantage l'enquête.

5.4.4.3. Recherche d'approfondissement (2003-2004)

A partir des observations réalisées dans ce cadre et dans un second temps (février-mars 2003), l'atelier de 10 expériences a été proposé à 36 enfants de 9 à 12 ans fréquentant deux classes primaires et spéciales de la ville de Bienne (Suisse). Proposées sous forme de « défis » que des binômes d'enfants doivent tenter de résoudre, quatre seulement parmi elles ont fait l'objet d'entretiens dans le cadre du pré-test (les quatre premières dans les tableaux 5 et 6).

Une seconde séance a été réalisée environ un an plus tard (mars 2004), avec les mêmes élèves et dans les mêmes conditions. Seules les trois expériences intermédiaires des tableaux 5 et 6 ont été reprises dans ce post-test :

- *La course des balles*, en tant qu'expérience contre-intuitive au moment de l'observation du résultat ;
- *Le ludion*, en tant qu'expérience apparemment impossible à réaliser (et techniquement impossible également, du moins tant qu'on n'a pas eu l'idée d'appuyer sur la bouteille), mais pas spécialement contre-intuitive au moment de la réalisation (si ce n'est qu'elle va à l'encontre de l'intuition selon laquelle elle est impossible) ;

- *Les feuilles amoureuses*, qui conjugue les deux caractéristiques des deux expériences précédentes (apparemment impossible à réaliser et très contre-intuitive au moment de sa réalisation).

Les résultats au pré-test de l'expérience *Chaud ou froid ?* n'ont dès lors pas été intégrés à la recherche d'approfondissement. Pour autant tout à fait exploitables, ils ont été ajoutés à ceux de la recherche préliminaire, qui avait été réalisée dans des conditions similaires avec un public familial.

Les résultats de cette recherche d'approfondissement sont synthétisés dans la sous-partie *8.2. Résultats* et détaillés dans l'annexe *12.2. Résultats de la recherche expérimentale*. Ils constituent, de manière secondaire à l'objectif de la thèse, une étude approfondie de la notion d'expérience contre-intuitive, de son intérêt pédagogique et de ses modalités de mise en œuvre.

5.4.5. Recueil et traitement des données

5.4.5.1. Deux types d'entretiens

Notre recherche s'appuie sur un ensemble de questions allant du plus général au particulier (Maisonneuve & Margot-Duclot, 1963). Cette manière d'approcher le sujet de façon de plus en plus précise permet d'utiliser les réponses aux questions, non seulement de manière individuelle, en cernant l'évolution de la pensée de la personne interrogée à travers la suite des réponses données, mais également de manière transversale en faisant émerger les conceptions les plus communes sur des sujets donnés.

Le diagnostic préalable ayant conduit à formuler l'idée selon laquelle la prévision du résultat d'une expérience contre-intuitive la rend plus contre-intuitive que si elle est actionnée sans questionnement préalable (prédiction 5), il a été décidé de faire débuter la moitié des entretiens avant la réalisation de l'expérience (et donc l'obtention du résultat expérimental), et l'autre moitié juste après.

5.4.5.2. Enquête « grand-public » préliminaire

Dans un premier temps (novembre 2002), une enquête relativement large, portant sur les cinq expériences décrites plus haut, a été menée sur 87 personnes dans le cadre d'un atelier expérimental de dix expériences contre-intuitives de l'association *Les Atomes Crochus*, sur le stand du CNRS lors de la Fête de la Science organisée à la *Cité des Sciences et de l'Industrie* (Paris).

Lors de cette recherche préliminaire, deux types de questionnaires furent utilisés pour valider les intuitions évoquées plus haut, étape nécessaire avant de pouvoir mener les entretiens ultérieurs en situation scolaire, et mettre ainsi à l'épreuve le modèle allostérique formalisé.

Premier type d'entretien

L'enquêteur pose une question préalable à toute expérimentation par le participant. Il lui laisse découvrir le « défi », comprendre ce qui lui est demandé de faire, puis lui demande d'anticiper le résultat.

EXEMPLE D'ENTRETIEN

- **Bonjour, vous êtes ici dans le défi « chaud ou froid ». Voici la question à laquelle vous devez répondre : « *Si vous mesurez la température dans la pelote de laine et dans la boule d'aluminium mises à votre disposition, quel résultat allez-vous obtenir ?* »**
  L'enquêteur laisse à son interlocuteur le temps d'observer la pelote de laine et la boule d'aluminium, ainsi que le thermomètre mis à sa disposition.
- **Pouvez-vous me dire ce que vous pensez que sera le résultat ?** Attente de la réponse.
- **Pourriez-vous m'expliquer pourquoi vous pensez que… (l'enquêteur reprend la réponse qui vient d'être formulée).** Explication du participant. L'enquêteur n'intervient que s'il ne comprend pas ce qu'il veut dire, mais n'induit pas de résultat, ni d'autres explications possibles. Il laisse ensuite le participant

expérimenter à sa guise. Si ce dernier est trop perturbé pour se lancer dans l'expérimentation, l'enquêteur peut le stimuler en lui demandant :

- **Et avec le matériel mis à votre disposition, pourriez-vous trouver une réponse à cette question ?** Il lui laisse à nouveau le temps d'expérimenter, sans intervenir. Puis il lui demande :
- **Alors, quel résultat trouvez-vous ? ... Est-ce la même chose que ce que vous croyiez au départ ?** Il attend une réponse claire du participant, qui constitue celle que ce dernier va noter sur sa feuille de défi.
- **Etes-vous en mesure d'expliquer ce résultat ?** Réponse du participant, sans intervention de l'enquêteur.
- **Dernière question : pouvez-vous m'indiquer votre âge ?** Et, si c'est un adulte : **Avez-vous une formation scientifique ?**

Ce type d'entretien permet l'identification des heuristiues et conceptions initiales (en l'occurrence, intuitives) afin de mettre en évidence la pertinence de la contre-intuitivité de l'expérience. En d'autres termes, il permet de répondre aux questions suivantes : le sujet donne-t-il des prévisions inverses au résultat qu'autorise l'expérience ? Si oui, comment explique-t-il ce résultat ? En quels termes, en faisant appel à quel cadre de référence, à quels modes de raisonnement, à quelles croyances ? Il devait ainsi nous permettre de confirmer les quatre premières prédictions (prédictions 1 à 4), tout en procurant une appréhension intuitive des trois dernières (prédictions 6 à 8).

Second type d'entretien

L'enquêteur n'intervient qu'après la manipulation. Il relève le temps que le participant passe avant de saisir les objets d'expérimentation. Lorsqu'il inscrit son résultat sur sa feuille de "défi", il lui demande de l'expliciter et d'argumenter.

EXEMPLE D'ENTRETIEN

- **Bonjour, vous êtes ici dans le défi « ségrégation ». Allez-y, je vous laisse répondre à votre défi.** L'enquêteur n'intervient à aucun moment des essais. S'il en a l'occasion, il enregistre ou note les principales réactions du participant. Il attend, pour intervenir, que ce dernier ait noté le résultat de l'expérience sur sa feuille de défi.
- **Pouvez-vous m'indiquer la réponse que vous avez donnée ?** Attendre la réponse du participant.
- **Pourriez-vous m'expliquer pourquoi ... (l'enquêteur reprend la réponse qui vient d'être formulée).** Explication du participant. L'enquêteur n'intervient que s'il ne comprend pas ce qu'il veut dire, mais n'induit pas de résultat, ni d'autres explications possibles.
- **Dernière question : pouvez-vous m'indiquer votre âge ?** Et, si c'est un adulte : **Avez-vous une formation scientifique ?**

Ce deuxième type d'entretien devait nous permettre de répondre à la cinquième prédiction, tout en confirmant l'intérêt expérimental des trois dernières (prédictions 6 à 8).

5.4.5.3. Approfondissement : pré-test en situation scolaire

Lors du pré-test des mois de février-mars 2003 réalisé dans le cadre de la recherche d'approfondissement, les entretiens furent menés grâce à l'utilisation des questions ci-dessous, légèrement modifiées en fonction des observations de la recherche préliminaire. Les enfants étaient sollicités sur les quatre expériences test, durant leur parcours en binôme dans l'atelier des 10 expériences contre-intuitives proposées. L'enquêteur s'assurait qu'ils en avaient toujours réalisé au moins trois avant de les interroger.

- **Bonjour, tu es ici dans le défi « La course des balles ». Voici la question à laquelle tu dois répondre : « *De la balle de tennis et de la boule de pétanque, laquelle tombe le plus vite ?* ».**

  L'enquêteur laisse à l'enfant le temps d'observer le matériel.
- **Qu'est-ce que tu en penses ? Tu peux essayer de prévoir le résultat ?**
  Attente de la réponse. Si la réponse est que les deux balles ne tombent pas en même temps, demander :
- **Lorsque la balle (de tennis/de pétanque) touchera le sol, à quelle distance du sol se trouvera l'autre si on les laisse tomber d'une hauteur de 2 m ?** Attente de la réponse.
- **Est-ce que tu pourrais m'expliquer pourquoi tu penses que… (l'enquêteur reprend la réponse de l'élève).**
  Explication de l'enfant. L'enquêteur n'intervient que s'il ne comprend pas ce qu'il veut dire, mais n'induit pas de résultat, ni d'explications autres possibles. Il laisse le temps à l'enfant d'expérimenter, sans intervenir. Puis il lui demande :
- **Alors, quel résultat est-ce que tu trouves ? … Est-ce que c'est la même chose que ce que tu croyais ?**
  Attendre une réponse claire de l'enfant, celle qu'il va noter sur sa feuille de défi.
- **Et est-ce que tu peux expliquer ce résultat ?**
  Réponse de l'enfant, sans intervention de l'enquêteur.
- **Dernière question : peux-tu me dire ton âge ?**

Ce type d'entretien devait permettre la mise en évidence des conceptions initiales de l'enfant. En explicitant ses prédictions et en analysant le résultat obtenu, il devait donc donner accès, à travers l'interprétation des termes utilisés, à son cadre de référence, ses modes de raisonnement, ses interprétations, ses croyances, etc. Les interactions au sein du binôme n'étaient pas interdites durant l'entretien ; les résultats en annexe montrent qu'au contraire ils allaient apporter des éléments intéressants en termes de stabilisation des conceptions sous l'influence de l'opinion d'un camarade.

5.4.5.4. Approfondissement : post-test en situation scolaire

Réalisé dans les mêmes conditions une année après la réalisation de l'atelier initial, le post-test prenait appui sur un second entretien. Celui qui fut réalisé dans le cadre de la recherche d'approfondissement (mars 2004) se fondait sur les questions ci-dessous.

- **Bonjour, est-ce que tu te souviens de cette expérience ?**
- **Est-ce que tu te rappelles comment tu avais fait pour la réussir ?**
- **Te souviens-tu du résultat que ça donnait ?**
- **Est-ce que tu pourrais me dire pourquoi ça donnait ce résultat ?**
  L'enfant peut alors essayer de réaliser une nouvelle fois l'expérience en fonction de ses souvenirs.
- **Est-ce que ça correspond à tes souvenirs ?**
- **Tu peux expliquer pourquoi ?**

Interrogés individuellement, seuls les enfants ayant participé au pré-test ont été pris en considération. Contrairement à ce dernier, lors duquel l'ensemble de l'atelier de 10 expériences était réalisé, les questions portaient cette fois exclusivement sur les 3 « défis » qui constituaient le corpus de cette recherche.

5.4.5.5. Traitement des enregistrements

Dans un premier temps, les enregistrements audio réalisés furent retranscrits mot pour mot par écrit, et anonymés : chaque série de réponses portait alors un numéro, choisi de manière aléatoire entre 1 et

le nombre de participants. Les numéros furent associés aux lettres *a*, *b*, *c*, *d*… si l'entretien avait été réalisé en présence de plusieurs participants (ce qui arriva quelques fois dans la recherche préliminaire, et ce qui fut organisé presque systématiquement dans le pré-test de la recherche d'approfondissement). La correspondance entre les numéros et les noms des personnes interrogées fut conservée sur un document à part.

Dans toute la suite, la référence à ce code est annoncée par un astérisque devant le numéro, lui-même suivi d'une lettre le cas échéant (exemple : *13a) ; l'annexe *12.2. Résultats de la recherche expérimentale* permet en outre de savoir si l'individu concerné est un homme (/garçon : G) ou une femme (/fille : F) et de retrouver son âge en cas de besoin (deuxième colonne des tableaux de résultats).

5.5. Schéma général de la recherche

Nous inspirant de l'organigramme proposé par J. Guichard (1990) concernant le protocole de conception d'une exposition, les schémas ci-contres (figures 36 et 37) présentent l'enchaînement des différentes étapes de notre recherche.

5.6. Limites de la recherche

Les limites à l'ensemble de cette étude sont à la fois d'ordres théorique, expérimental, méthodologique et épistémologique.

5.6.1. Limites théoriques

Sur le plan théorique d'abord, la capacité d'explicitation du modèle allostérique formalisé commence au-delà des apprentissages fondamentaux (langage, calcul, lecture et écriture, etc.) qui relèvent d'autres modèles spécifiques. Très lié à l'élaboration de connaissances, il ne peut par ailleurs guère être invoqué pour l'apprentissage de comportements et gestes techniques, si ce n'est pour ce qui concerne leurs dimensions métacognitives. Il s'arrête en particulier aux situations nécessitant la prise en compte d'éléments émotionnels forts. Il est en outre limité aux apprentissages individuels, la nature de la modélisation employée ne permettant pas, à ce stade du travail, de représenter les interactions entre agents lorsqu'ils apprennent conjointement, combinant leurs conceptions pour produire une connaissance opératoire commune. Il introduit enfin un certain nombre de paramètres phénoménologiques qui, s'ils peuvent être reliés à d'autres théories, mériteraient d'être davantage explicités. Ces limites théoriques ne sont pas rédhibitoires et n'invalident pas le travail réalisé ; elles fixent simplement un domaine de validité relatif à l'application du modèle, comme c'est le cas pour tous les modèles scientifiques, et pourraient permettre de prescrire des recherches ultérieures visant à éclairer les paramètres nouvellement introduits.

5.6.2. Limites pratiques

D'un point de vue pratique, et comme nous l'avons déjà mentionné au sujet du corps de la théorie, il est assez difficile de préconiser l'utilisation en classe des cartes conceptuelles que constituent les quatre environnements didactiques, trop riches et foisonnantes pour pouvoir s'y retrouver simplement. Probablement faudrait-il les simplifier et les adapter à des situations particulières, en supprimant les disques centraux pour alléger la lecture. En effet, une fois la théorie validée, il doit être possible de faire confiance aux applications pédagogiques qui en découlent sans avoir à les revérifier systématiquement.

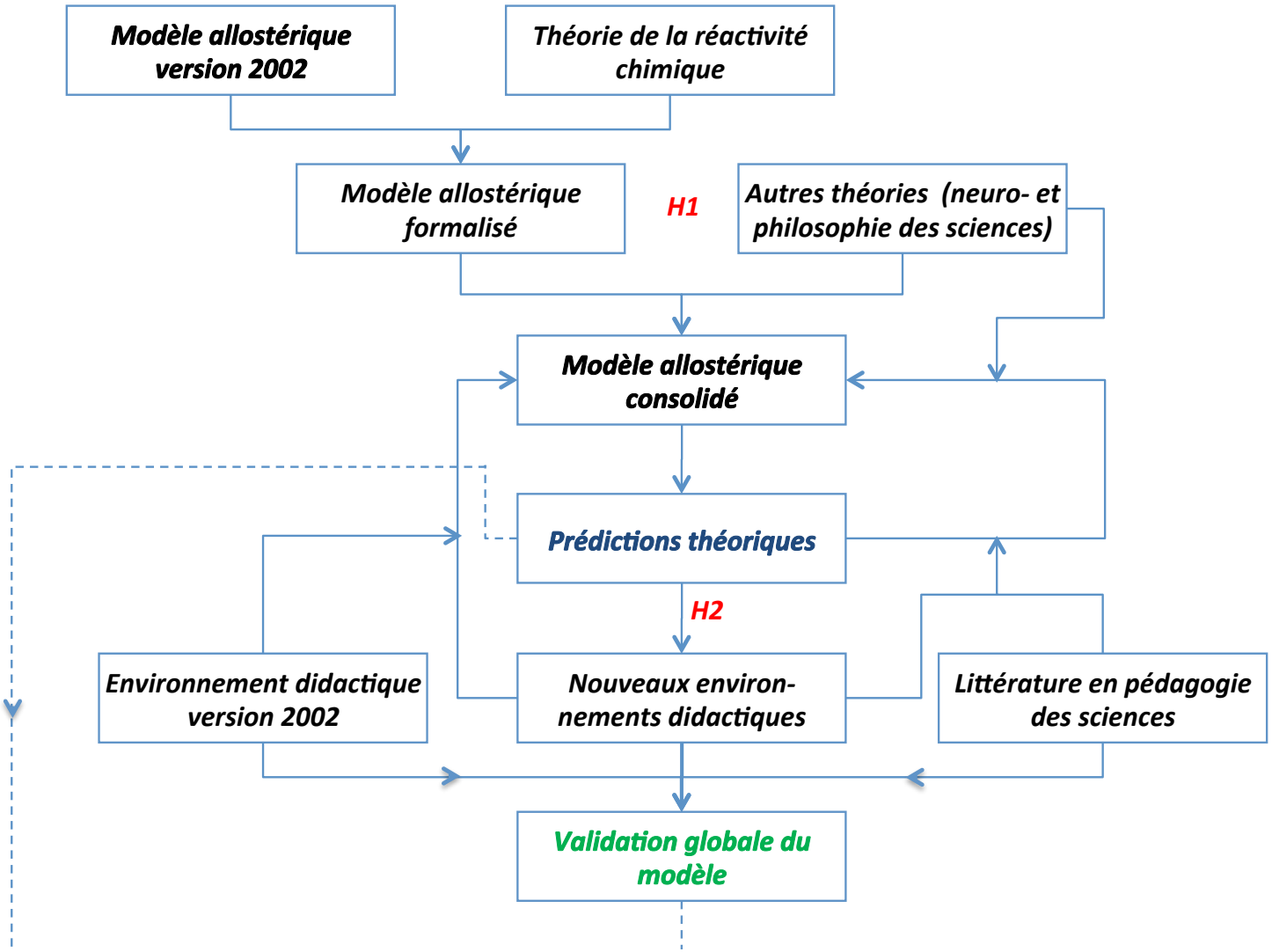
5.6.3. Limites méthodologiques

Sur le plan méthodologique, la recherche expérimentale est limitée par la nature et le nombre des expériences utilisées. Même à l'intérieur du cadre général de l'expérience contre-intuitive, qui constitue déjà un choix en lui-même, la question de la pertinence des manipulations retenues se pose. Dans notre étude, leur choix a essentiellement été réalisé selon des critères de faisabilité technique et d'accessibilité pédagogique en termes de formulation et de contenus théoriques. L'option consistant à attribuer un rôle de falsification au protocole expérimental mis en œuvre permet de relativiser cette limite, mais il serait intéressant de mener des études similaires à partir d'autres expériences, issues de disciplines différentes. D'autres limites, spécifiques à la recherche expérimentale et observées lors de la mise en œuvre des deux volets qui la composent, seront évoquées aux paragraphes *8.2.2.10 Apports et limites de la recherche préliminaire* et *8.2.3.4. Limites de la recherche d'approfondissement*.

5.6.4. Limites épistémologiques

Sur le plan expérimental enfin, les prévisions du modèle sont si vastes qu'il est impossible de prétendre le tester intégralement. A ce titre, l'étude expérimentale décrite plus haut semble insuffisante pour éprouver d'autres dimensions du modèle que celles qui sont liées aux expériences contre-intuitives, alors que l'évaluation des aspects généraux sur la base d'un environnement didactique global ne peut valider tous les détails. Certes l'étude expérimentale a-t-elle été légitimement imaginée pour constituer, non pas une validation directe du modèle, mais une mise à l'épreuve d'ordre falsificationniste ; d'autres études pourraient toutefois être avantageusement conduites pour assurer les premiers résultats expérimentaux.

Enfin, on ne peut nier que le choix des formalismes de la réactivité chimique comme outil de description des processus d'apprentissage est intimement lié à la formation initiale de l'auteur de ce travail. Par conséquent, rien ne prouve que le recours à d'autres formalismes, inspirés par d'autres disciplines, n'auraient pas été tout aussi pertinents, voire meilleurs. Il est par ailleurs nécessaire d'avoir conscience que cette analogie peut se révéler réductrice dans la mesure où, comme toute approche théorique, elle délimite des domaines d'explicitation par les limitations même des outils qu'elle emploie.


Modèle allostérique version 2002
Théorie de la réactivité chimique
Modèle allostérique formalisé
H1
Autres théories (neuro- et philosophie des sciences)
Modèle allostérique consolidé
Prédictions théoriques
H2
Environnement didactique version 2002
Nouveaux environ-nements didactiques
Littérature en pédagogie des sciences
Validation globale du modèle

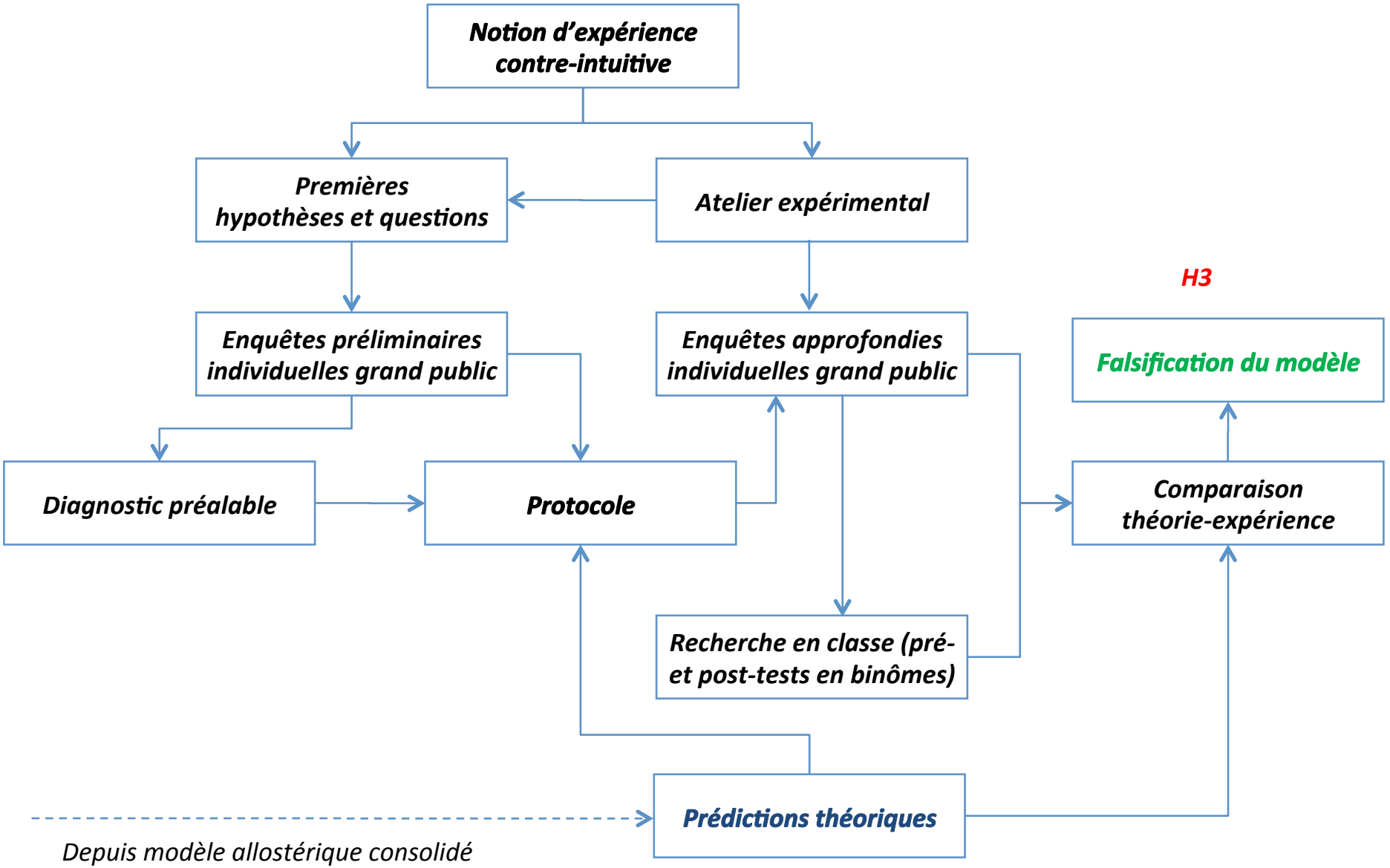


Figure 37 : Schéma organisationnel de la recherche expérimentale (*H3*).

Cette partie méthodologique nous a permis de décrire de quelles différentes ma
hypothèses de recherche allaient pouvoir être testées. Chacune des trois parties suiva
applicative et expérimentale) correspond à ces différentes approches méthodologiqu
chacune de ces hypothèses. Compte tenu de la nature essentiellement théorique de
partie 6 qui constitue le cœur de notre travail de recherche, les parties 7 et 8 constitua
volets de sa validation pratique.

6. PARTIE THEORIQUE : FORMALISATION DU MODELE ALLOSTERIQUE (H1)

« Ici, nous sommes dans une école, Mr Potter, pas dans le monde réel ! »
J.K. Rowling (2003), écrivain britannique.

L'objectif de cette partie consiste à corroborer notre première hypothèse de recherche.

Hypothèse 1 :	*Il est possible de reformuler le modèle allostérique de l'apprendre en lui appliquant le formalisme de la réactivité chimique appliqué aux protéines allostériques, sous une forme compatible avec les diverses théories de l'apprentissage et de la pensée. Il devrait alors en résulter des prolongements théoriques inédits et féconds en termes de compréhension des processus d'apprentissage.*

Elle développe en détails le modèle allostérique de l'apprendre dans une version formalisée qui :

- Prend comme point de départ la version de 2002 du modèle, décrite dans la sous-partie *3.3. Le modèle allostérique de l'apprendre* ;
- S'intègre dans le cadre des modèles de changement conceptuel exposés dans la sous-partie *3.2. La théorie du changement conceptuel* ;
- Fait de la métaphore de l'allostérie une analogie en exploitant les formalismes de la *réactivité chimique*, comme justifié dans la section *4.3.1. Possibilités de formalisation du modèle* ;
- S'appuie sur la méthodologie de construction précisée à la section *5.2.1. Approche épistémologique* ;
- Exploite les concepts et théories développées par les sciences cognitives, décrits dans la section *3.4.3. Apports théoriques* et rappelés dans la section *5.2.2. Corpus théorique en sciences cognitives et philosophie des sciences*.

En outre :

- La pertinence du choix du modèle allostérique pour décrire les processus d'apprentissage complexes a été défendue dans la sous-partie *4.2. La piste de l'allostérie* ;
- Le plan suivi dans cette partie découle directement des éléments développés et problématisés dans la sous-partie *4.3. Vers un modèle allostérique de l'apprendre formalisé*, auquel il pourra être utile de se référer durant la lecture de ce chapitre.

6.1. Validité et légitimité de l'analogie

Le recours à l'analogie avec la réactivité chimique des molécules, et des protéines allostériques en particulier, repose avant tout sur la définition des processus d'apprentissage donnés par le modèle allostérique de l'apprendre : « *un processus dynamique de transformation du savoir, par déconstruction – reconstruction des structures de pensée préexistantes, sous l'influence de l'environnement de l'apprenant* ». En effet, une définition de la réaction chimique peut être formulée exactement dans les mêmes termes, dans la mesure où elle peut être définie comme « *un processus dynamique de transformation de la matière, par déconstruction – reconstruction des structures supramoléculaires préexistantes, sous l'influence du milieu réactionnel* ». Développons cette idée…

Dans ce cadre, l'analogie s'appuie à la fois sur la possibilité de représenter *matière* et *savoir* par des *entités* similaires, et sur des similitudes fortes en termes de *comportements* :

1. La perspective réductionniste adoptée par le modèle allostérique, qui permet de faire émerger l'idée de conception comme unité active de la pensée, à la fois constitutive du savoir, grille d'analyse des informations fournies par l'extérieur et sujette à modifications lors de l'apprentissage, s'inscrit dans la même perspective que celle du biochimiste qui conçoit la protéine à la fois comme une unité structurale et/ou fonctionnelle réactive et un senseur du milieu cellulaire.
2. L'idée forte selon laquelle la transformation s'effectue selon un processus de « déconstruction-reconstruction » nécessite, dans les deux domaines, une phase de déstabilisation des structures initiales, qui se traduit par la nécessité de franchir ce que les chimistes nomment une *barrière d'activation*. Plus grande est la réorganisation du système, plus haute est la barrière et/ou plus nombreuses doivent être les étapes intermédiaires pour faciliter son franchissement. Une notion fondamentale en chimie-physique, représentée par une fonction dite « courbe d'activation » (figure 38), que l'on retrouve dans le concept de *remapping* issu de la théorie du recyclage neuronal de Dehaene, selon lequel : « *The speed and ease of cultural acquisition in children should be predictable based on the complexity of the cortical remapping required* » (Dehaene & Cohen, 2007).

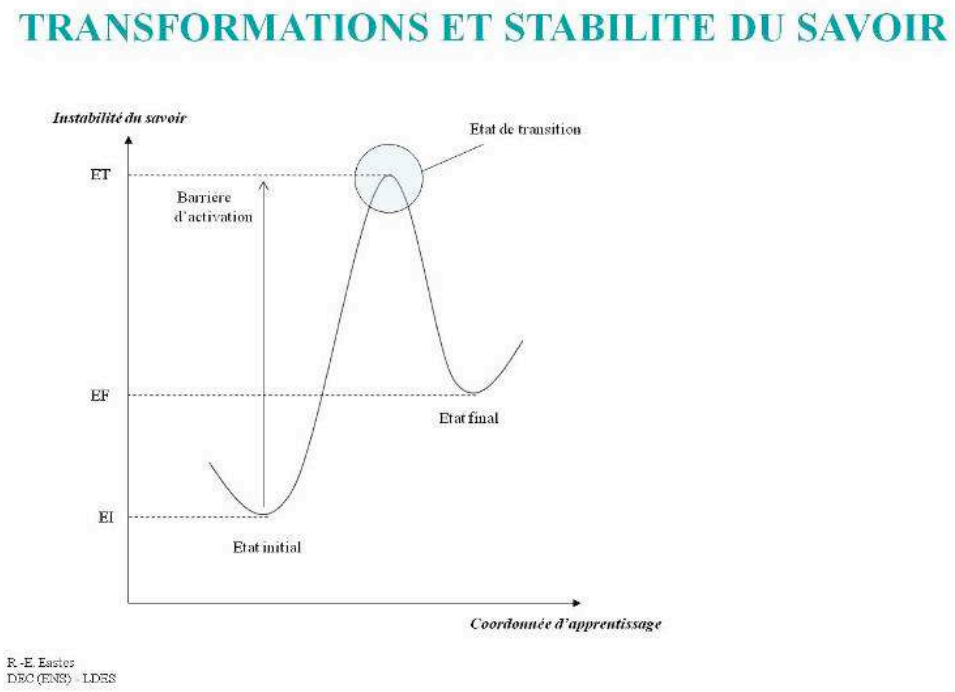


Figure 38 : La courbe d'activation des chimistes,
applicable aux processus d'apprentissage ? (Eastes & Pellaud, 2004b)

Conformément à la condition nécessaire décrite dans le paragraphe *5.2.1.1. L'allostérie : de la métaphore à l'analogie – Ecueils potentiels*, ces deux conditions (consistant en la concordance simultanée des entités de base et de leurs comportements) suffisent à légitimer la tentative de faire de la métaphore initiale une analogie. Cette condition n'est toutefois suffisante ni pour que l'analogie soit pertinente, ni pour permettre la définition de ses limites. Pour ce faire, il est nécessaire de construire pas à pas la théorie analogue et d'en vérifier à chaque étape la conformité avec la réalité.

En l'occurrence, dans la mesure où elle est fondée sur une analogie avec un modèle physique décrivant les transformations de la matière, la démarche que nous allons adopter dans la construction de cette théorie de l'apprendre se déroulera selon des phases inspirées par cette dernière, à savoir :

1. La caractérisation des unités de bases constitutives du système entier (*matière* : molécules avec leurs sites actifs et leurs interactions réciproques ; *savoir* : conceptions et heuristiques) ;
2. L'étude de la manière dont ces entités interagissent entre elles et avec leur environnement (*matière* : réactivité des molécules ; *savoir* : processus de traitement de l'information) ;
3. La recherche des paramètres régissant les capacités différentielles des édifices constitués par ces entités à persister (*matière* : stabilité des systèmes moléculaires ; *savoir* : stabilité des assemblages de conceptions) ;
4. La détermination des conditions et modalités de transformation de ces édifices (*matière* : réactions chimiques ; *savoir* : apprentissage) ;
5. L'étude d'éventuels effets liés à l'environnement (*matière* : effets de milieu ; *savoir* : contrôles péricognitifs).

A posteriori, c'est la possibilité de prouver la pertinence du rapprochement entre les deux théories à chacune de ces étapes qui validera définitivement l'analogie.

6.2. Structure et organisation du savoir

Physiologiquement parlant, la *conception* ne peut certes pas être considérée comme étant localisée dans une région précise du cerveau ; mais la représentation sous la forme de protéine permet de la visualiser tout en préservant ses propriétés. En outre, la biologie moléculaire fournit une classe de molécules particulièrement adaptées à cette métaphore initiale, comme le suggèrent les études sur la *plasticité* du cerveau (Frackowiak *et al.*, 1997) ou le *recyclage neuronal* (Dehaene, 2005) : les protéines *allostériques*, dont la structure et la fonctionnalité changent sous l'influence de leur environnement biochimique.

6.2.1. Représentation du savoir

Bien qu'elles représentent des briques élémentaires du savoir, les conceptions, comme les molécules du vivant, ne sont ni autonomes ni isolées. Chacune d'entre elles peut être considérée comme étant reliée à beaucoup d'autres, par des liens plus ou moins solides, au sein d'agrégats complexes et organisés. Les descriptions du savoir effectuées dans la partie *3. Cadre théorique et pratique* présentent en outre ces assemblages comme n'étant ni rigides ni statiques, pas plus que ne le sont les protéines : plastiques et modifiables, plus ou moins robustes, les conceptions peuvent se faire ou se défaire au gré des besoins et des apprentissages (Barth, 1993).

Le savoir résulte ainsi de la juxtaposition de *conceptions* en interaction dynamique qui, telles les molécules du vivant, forment des assemblages souples et évolutifs. Nous le visualisons dès lors comme un ensemble de protéines, en interaction ou non selon que les conceptions qu'elles représentent constituent des systèmes explicatifs connectés (cas des connaissances en biologie et en chimie, par exemple) ou non (cas de croyances religieuses et de connaissances scientifiques contradictoires).

Leur plasticité leur permet bien entendu, dans certains cas, d'entrer en interaction (cas de questions métaphysiques suscitées par des connaissances scientifiques par exemple), mais il arrive également qu'elles soient totalement incompatibles, comme nous l'avons vu au paragraphe *3.4.3.6. Les mécanismes de l'inhibition cérébrale* avec l'évocation des « plis du temps cognitif de l'enfant » par Houdé (1999), inspiré par Serres (1992), que traduit la coexistence du « rationnel construit » et de « l'irrationnel présumé révolu ». Comme lui, on parlera plus loin de *« plis cognitifs » disjoints* ou, en référence aux paradigmes de Kuhn (1970), de *paradigmes de pensée incommensurables*.

6.2.2. Structure fine des conceptions

A la manière des protéines, qui résultent de l'agencement d'acides aminés, les conceptions peuvent être imaginées comme étant constituées de sous-unités élémentaires, dont les organisations spatiales et fonctionnelles leurs confèrent leurs propriétés en termes de savoir constitué, mais aussi leur capacité à traiter ou intégrer des informations nouvelles. Au niveau du système cognitif, une correspondance pertinente (et que nous justifierons plus loin) semble être celle de ces informations cérébrales élémentaires (orientation d'une ligne, petit nombre, etc.) avec les acides aminés.

Or c'est l'organisation de ces sous-unités qui construit leur capacité à produire du sens. C'est pourquoi les structures primaires, secondaires, tertiaires et quaternaires des protéines (figure 39), liées à l'existence de liaisons chimiques de natures variées (liaisons covalentes simples et multiples, ponts disulfures, liaisons hydrogène, interactions de Van der Waals…), rendent l'analogie allostérique d'autant plus séduisante qu'elles permettent de représenter les conceptions selon plusieurs niveaux de complexité, qui rappellent notamment ceux des *cortical maps* de Dehaene (Dehaene & Cohen, 2007) évoqués dans le paragraphe *3.4.3.4. Le recyclage neuronal*.

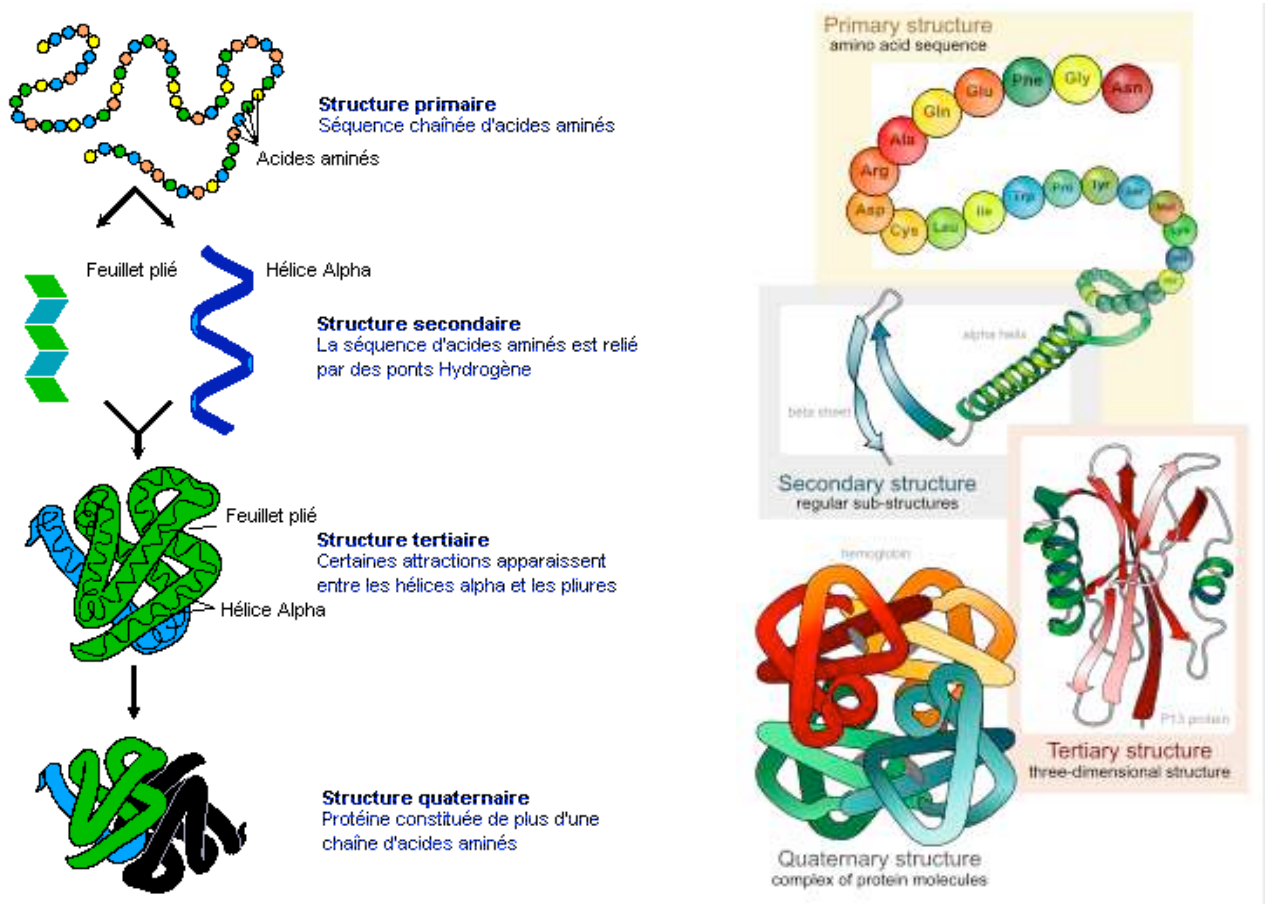


Figure 39 : Les différentes structures (primaire, secondaire, tertiaire, quaternaire) d'une protéine.

Dans cette perspective, l'acide-aminé inclus dans la structure primaire de la protéine pourra être rapproché de l'idée de *micromap*. Localement, l'organisation de plusieurs acides-aminés dans une structure secondaire (boucles, hélices α ou feuillets β, qui confèrent à la protéine sa réactivité) pourra quant à elle être considérée comme représentative de la *mesomap*. Enfin la structure tertiaire de la protéine, repliée de manière plus complexe encore (figure 40) et qui lui confère sa fonction globale, s'associe facilement à l'idée de *macromap*.

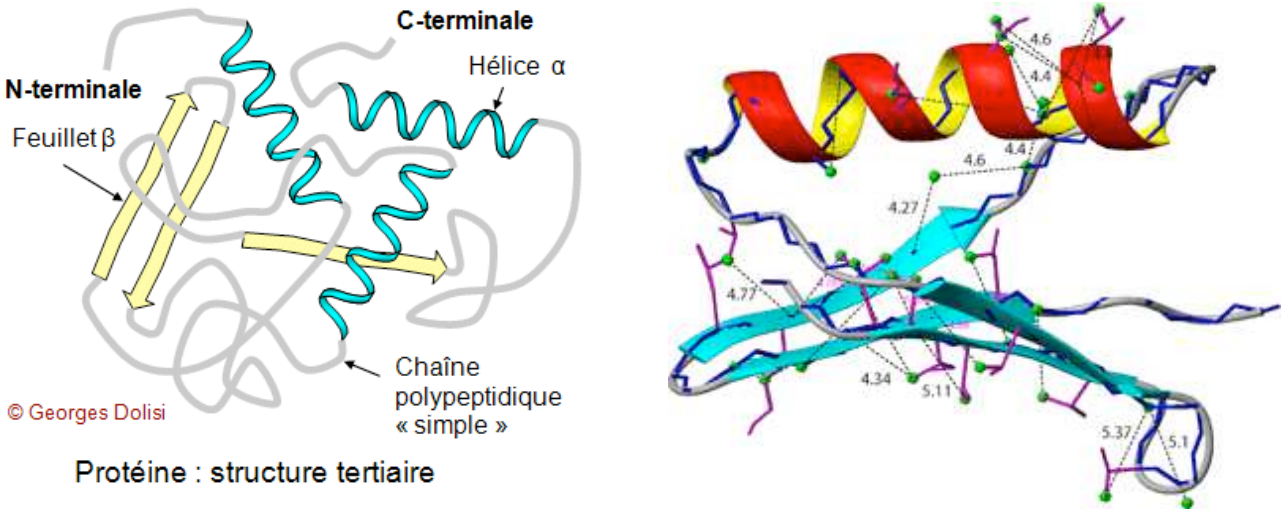


Figure 40 : Exemples de structure tertiaire. La représentation de la structure moléculaire des acides aminés particuliers, qui agissent « en commun » au sein des structures qu'ils composent, est remplacée par une schématisation à une échelle supérieure sous forme de lignes et de rubans.

En interactions mutuelles plus ou moins fortes, les conceptions forment des structures mentales dynamiques enchevêtrées qui, à la manière des assemblages supramoléculaires décrits par la chimie, possèdent des propriétés émergentes dont ne disposent pas les conceptions considérées isolément. C'est ainsi que le *schème de pensée*, unité élémentaire de l'activité intellectuelle (Piaget, 1967) trouve à son tour une représentation pertinente : en tant qu'assemblage de conceptions indépendant, il peut être comparé à un groupe de protéines en interactions au sein d'une structure quaternaire ; une structure supramoléculaire connue pour associer plusieurs protéines distinctes en leur conférant justement des propriétés émergentes[54].

On notera qu'il aurait été possible de faire correspondre l'unité élémentaire d'information cérébrale aux atomes constituant les acides aminés, et non pas aux acides aminés eux-mêmes. Nous préférons toutefois effectuer le rapprochement à l'étage suivant en négligeant la composition des acides aminés. En premier lieu parce qu'ils ne sont pas représentés dans les schémas des protéines, en second lieu parce que le rapprochement entre les *mesomaps* et la structure secondaire des protéines nous semble plus pertinente que celui qu'il faudrait alors faire entre *mesomaps* et structure primaire.

6.2.3. Préexistence des sous-unités d'information cérébrale

Parmi toutes les conceptions possibles, certaines semblent innées, comme l'ont montré les travaux sur les connaissances et compétences naïves décrits dans le paragraphe *3.4.3.1. Les théories naïves*, mais la plupart sont acquises. Pourtant, comme le précise la *théorie du recyclage neuronal* (Dehaene, 2005), elles ne peuvent se constituer que par l'organisation spécifique d'éléments structuraux déjà présents chez le nourrisson. Cela revient à considérer la construction du savoir non plus comme l'assimilation d'éléments nouveaux, mais comme l'établissement de liens et de règles d'organisation entre des éléments de base disponibles dès le départ, en toutes circonstances et aussi souvent que nécessaire, conduisant à des agencements plus ou moins sophistiqués.

---

[54] Nous utiliserons le concept de schème de pensée dans le cadre de la définition selon laquelle les unités élémentaires de l'activité intellectuelle ne sont pas des sensations, des perceptions ou des actions mais des schèmes, entités abstraites régissant l'organisation d'actions (schème de succion, schème réflexes...). Progressivement, les schèmes se transforment en devenant plus généraux (succion d'autres objets), plus nombreux, et deviennent plus « mobiles » : ils se combinent dans une organisation de type moyen-but (par exemple, utiliser un râteau pour attraper un objet). A cet égard, ils sont particulièrement compatibles avec l'idée de conceptions se combinant selon des structures similaires aux structures quaternaires des protéines.

Dans la description allostérique du savoir et de l'apprentissage, on considérera donc que tout individu possède dès la naissance un stock complet des acides aminés évoqués plus haut, en quantités illimitées, comme autant de « pièces détachées » destinées à la construction des conceptions ultérieures ; parfois facilement comme dans le cas des apprentissages par imprégnation, parfois avec effort comme dans les cas de recyclage d'aires cérébrales. Bien entendu, de même qu'une sous-unité d'information cérébrale est susceptible d'entrer dans la constitution de n'importe quelle conception, un type d'acide aminé particulier pourra intervenir dans une multitude de protéines différentes.

Mieux, un schème de pensée, une conception ou une sous-conception peuvent être réemployés en diverses circonstances une fois qu'ils ont été élaborés : selon les cas et comme le décrit la théorie SRK (Rasmussen, 1983), ils sont détournés de leur usage initial, ou associés à d'autres sous-unités pour produire un raisonnement complexe et inédit, ou encore constitués de manière *ad hoc* à partir de sous-éléments préexistants. On considérera par suite qu'un motif de structure primaire, secondaire, tertiaire ou quaternaire déjà constitué sera toujours potentiellement disponible pour le traitement d'une information ou pour l'élaboration de connaissances et de compétences nouvelles. Le terme « potentiellement » a bien sûr son importance, car l'existence d'une structure de pensée, quelle qu'elle soit et quelle que soit son échelle d'organisation, ne garantira jamais ni qu'elle soit effectivement accessible, ni qu'elle soit employée convenablement, comme nous le verrons plus loin.

Ainsi donc, apprendre se réduit désormais à mettre en place des connexions entre unités mentales de base, à les défaire et à les réagencer ou, comme nous le verrons plus loin à mettre en place des règles circonstanciées pour leur utilisation (orientation, contrôle ou inhibition). On ne peut que remarquer l'analogie avec la synthèse chimique, où tout l'effort est placé dans le contrôle des règles d'assemblage d'unités moléculaires de base présentes en quantités suffisantes. C'est en particulier le cas des protéines, où l'ensemble des propriétés réside dans les différents niveaux d'organisation des acides aminés. Hélas, il n'existe pas, en matière d'apprentissage, d'équivalent de la synthèse des protéines (transcription de l'ADN en ARN messager, puis traduction de ce dernier en protéines) qui garantisse une construction (presque) aussi infaillible des savoirs individuels… Non qu'il n'existe pas d'équivalents à l'ADN (le corpus de connaissances d'une société, par exemple) et à l'ARN (les connaissances de l'enseignant), mais c'est l'efficacité des ribosomes responsables de la traduction qui pose problème, et qui requiert l'invention d'environnements didactiques efficaces.

6.2.4. La question du socle inné

Dans le cadre de ce nouveau modèle, il est nécessaire de caractériser un « support » permettant d'initier l'agrégation des éléments cognitifs de base (représentés par les acides aminés) et de conduire à l'élaboration des toutes premières conceptions. Un support constitué, dans le cadre des neurosciences, par le socle des connaissances naïves (Dehaene, Spelke *et al.*, 1999) et des fonctions cérébrales acquises par des millénaires d'évolution (Dehanene, 2007).

Substrats de l'activité intellectuelle ultérieure, l'ensemble de ces principes cognitifs, qui dépendent de l'organisation-même des structures cérébrales, sont peu compris et mal définis ; leur simple existence sera toutefois suffisante pour notre étude, dans la mesure où elle nous permettra de supposer l'existence d'un socle inné sur lequel les conceptions initiales d'un individu viendront se greffer, comme le représentent schématiquement les figures 41a, 41b et 41c.

Lors de la description des différents modèles de l'apprendre dans la sous-partie *2.2. Théories éducatives et modèles d'apprentissage*, nous avons montré que des modèles frustes tels que l'empirisme ou le behaviorisme pouvaient avoir une certaine pertinence pour décrire certains apprentissages simples (langage, concepts de base, gestes techniques…), et notamment les apprentissages s'effectuant « par imprégnation ». Dans la sous-partie *2.3. Pertinences relatives des modèles de l'apprendre*, nous avons en outre illustré, notamment grâce à la « métaphore de la maison », le fait qu'il était possible de faire correspondre des modèles plus ou moins sophistiqués aux fonctions

d'apprentissage en fonction de leurs complexités. Nous écrivions notamment : « *Si les premiers apprentissages d'un champ disciplinaire ou d'une activité (repensons au nourrisson) sont bien rendus par le modèle empiriste et complètement explicités par certains modèles cognitifs récents, les sensations et ressentis du modèle behavioriste sont nécessaires pour l'apprentissage de gestes et de réflexes un peu plus élaborés. Lorsque la pratique de l'activité se complexifie encore, l'appel à la raison (puis aux interactions sociales) est nécessaire pour progresser, c'est-à-dire organiser et relier ses nouveaux savoirs. La référence aux modèles constructiviste et socioconstructiviste est alors requise* ».

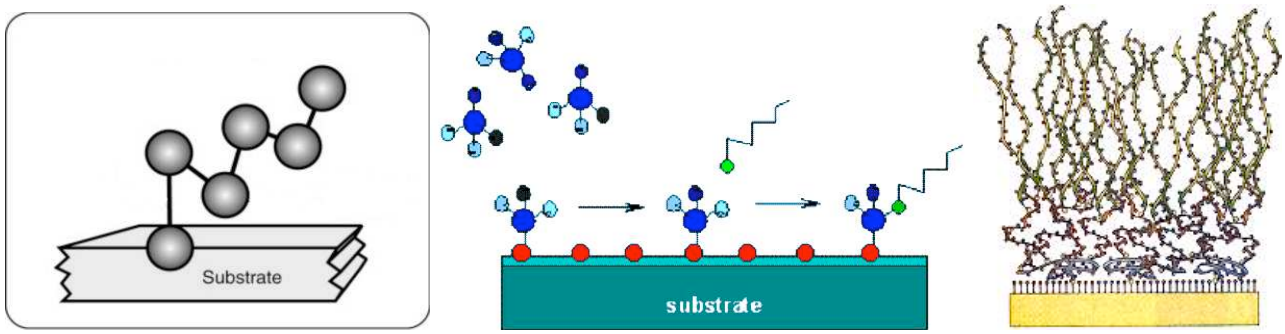


Figure 41 : Illustrations analogiques de l'ancrage des premières conceptions sur un socle de compétences innées.[55]

Si le modèle allostérique se démarque du constructivisme, il est donc tout de même raisonnable de conserver l'idée de structuration du savoir que ce dernier en donne, les premiers apprentissages étant utilisés lors de l'élaboration des savoirs ultérieurs.

6.2.5. Une structuration étagée

Par suite, l'organisation des assemblages de protéines décrits plus haut peut être imaginée sous une forme étagée, les premières conceptions élaborées par un individu sur un sujet donné étant *recouvertes* par les conceptions ultérieures. Ce faisant, les savoirs anciens, confortés par la possibilité d'y agréger de nouvelles conceptions, se stabilisent, se structurent et se solidifient. Une image qui évoque la distinction, en épistémologie, entre *science chaude* (en cours, instable, controversée, incomplète et insatisfaisante) et *science froide* (connaissances bien établies, validées et éprouvées par la communauté scientifique).

Notons bien que les anciennes conceptions sont recouvertes mais pas remplacées pour autant, de même que les fondations et les murs porteurs d'une habitation sont recouverts par les étages, qui contribuent éminemment à leur stabilité. C'est ce qu'illustrent les figures 42a, 42b et 42c, exploitant une représentation de modélisation informatique représentant la croissance d'un polymère greffé sur un substrat activé. Les billes rouges représentent les extrémités réactives des chaînes, les billes bleues constituent des chaînes libres et les vertes des chaînes ramifiées, déjà emprisonnées dans des structures robustes. Dans notre représentation, ces billes représentent les acides aminés des protéines-conceptions, évoquant les architectures biomoléculaires en « couches » qui sont notamment responsables de la mise en place des conformations complexes des protéines dans le monde vivant.

Dès lors, on visualise bien la manière dont les connaissances se construisent, et surtout la possibilité de leur évolution erratique, où coexistent le « rationnel construit » et « l'irrationnel présumé révolu », pour reprendre les mots de Houdé (1999). On visualise notamment la possibilité pour le savoir de se développer dans des directions différentes pour se rejoindre ensuite plus loin, dans l'interprétation des mêmes informations, mais sous des angles totalement différents, voire incompatibles, créant les « plis cognitifs » évoqués plus haut.

---

[55] Source de ces images et de celles des figures 39, 40, 42, 44, 45, 46, 55 et 56 reprenant des représentations de chimie et biochimie : documents de cours et d'enseignement personnels.

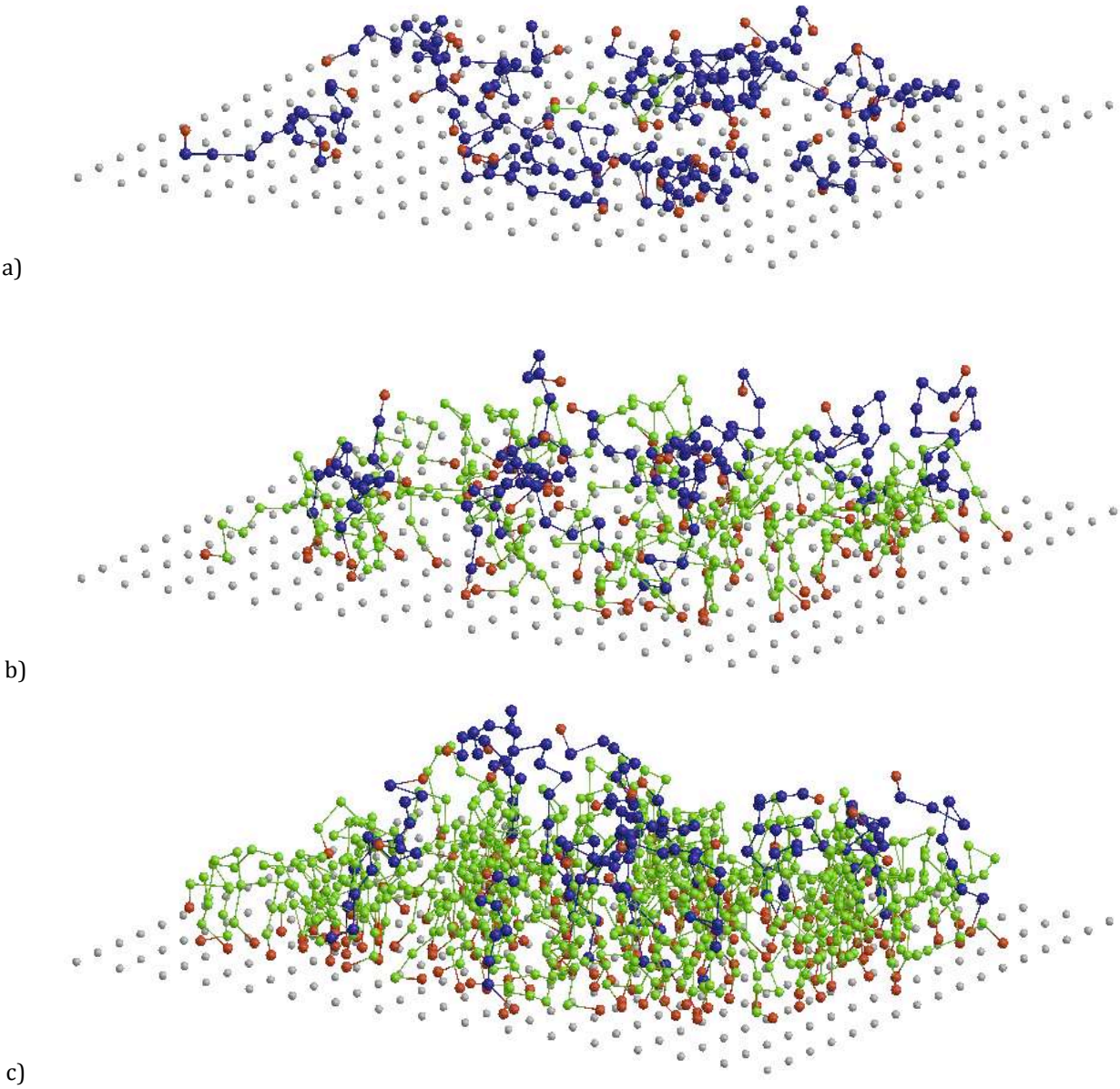


Figure 42 : Représentation de la construction du savoir par étagement progressif des conceptions.

Il apparaît par ailleurs évident que les premiers apprentissages, ceux qui construisent les conceptions qui serviront de bases aux suivantes, sont fondamentaux : qu'une conception primitive (telle qu'une opération algébrique élémentaires) soit mal construite (et les observations de ce type ne manquent pas dans les études didactiques, et pas seulement dans le domaine des mathématiques), et c'est tout l'édifice construit sur cette base qui sera un jour à revoir, nécessitant des efforts inouïs, et impliquant en outre du temps et souvent beaucoup de découragement. On prend la mesure, avec ce résultat, de l'influence de l'environnement familial sur les capacités futures des tous jeunes enfants en termes d'apprentissages scolaires…

Car ce que ces schémas permettent de visualiser, c'est l'idée même de « déconstruction-reconstruction » que nécessite la révision d'une connaissance mal acquise. Un processus évidemment plus aisé au niveau des chaînes bleues (qui représentent d'ailleurs relativement bien la partie incrémentable, au sens de l'accroissement des connaissances, de la « zone proximale de développement » de Vygotsky (1933)) que des vertes.

On réalise enfin bien mieux la possibilité, pour un individu donné, d'établir de nouveaux savoirs dans des domaines différents sous des formes qui puissent relever respectivement de l'imprégnation d'une part, et de la transformation radicale des savoirs préexistants d'autre part, la voie empiriste n'étant pas réservée aux petits enfants même si elle leur est plus habituelle que la « déconstruction-reconstruction » allostérique.

Mais surtout, ce que cette représentation permet de visualiser et de questionner, c'est la manière dont le savoir traite les informations nouvelles. C'est ce que nous allons développer dans la sous-partie suivante, autour des notions de sites actifs et d'heuristiques.

6.3. Représentation des processus cognitifs

6.3.1. Traitement de l'information et sites actifs

Dans le cadre de cette description, chaque nouvelle information reçue par un individu est confrontée à ses conceptions, qui la traitent de différentes manières. Elle peut en premier lieu être emmagasinée, intégrée au savoir comme autant d'éléments nouveaux qui s'y agrègent. C'est ce que commencent par faire tous les enfants du monde lorsqu'ils réalisent par exemple que des humains vivent « de l'autre côté de la Terre » ; une réaction parfaitement illustrée par Mafalda (figure 43), personnage de bande dessinée imaginé par l'argentin Quino, lorsqu'elle prend acte de sa position sur le globe terrestre (Quino, 1999).

Figure 43 : Illustration humoristique de la mise en œuvre d'une conception liée à la gravitation terrestre par Mafalda.

Mais l'information peut également être analysée par diverses conceptions, qui produisent une réponse au stimulus qu'elle constitue. Dans l'exemple précédent, l'information est non seulement emmagasinée (4e planche), mais elle est en outre analysée par une conception à laquelle les enfants (et Mafalda) font instantanément appel car elle entre en contradiction immédiate avec leur perception directe (et sensible) du monde : celle qui leur permet de se représenter le champ de gravitation terrestre. Parce qu'ils ne sont pas capables de l'exercice d'abstraction qui consiste à transposer le champ de gravitation à la mappemonde en même temps que les personnages qui se trouvent à la surface du globe, ils appliquent à cette dernière le champ qu'ils expérimentent eux-mêmes dans la réalité, et en déduit qu'ils sont « la tête en bas ».

La conséquence de cette analyse sera, comme nous l'avons vu à la figure 19, soit la détermination d'une solution adaptée à la conception, soit une déformation de l'information, soit son rejet pur et simple soit, dans le meilleur des cas mais sans grand espoir, à la transformation de la conception elle-même. Nous verrons ultérieurement ce que Quino a imaginé mais, dans le cadre de notre analogie allostérique, nous pensons pertinent d'associer cette capacité de traitement de l'information très affûtée à la région spécifique qui, dans une protéine, permet de traiter spécifiquement un réactif chimique : son *site actif*.

En effet, à l'égard d'une protéine, une molécule donnée peut soit être indifférente, soit se lier à elle dans une région nécessairement dotée d'une certaine réactivité, d'où la dénomination de *site* « *actif* ». Selon les cas, la molécule est transformée ou transforme la protéine (en provoquant des modifications de sa structure ou en l'inhibant par une liaison irréversible). Parfois, le site actif permet de faire réagir ensemble deux molécules : c'est ce que montre la figure 44 où deux molécules A et B viennent simultanément prendre place dans un site actif pour conduire au substrat AB. Ces processus sont parfois temporaires et/ou réversibles, comme c'est le cas pour le transport de la molécule de dioxygène par la protéine allostérique nommée hémoglobine.

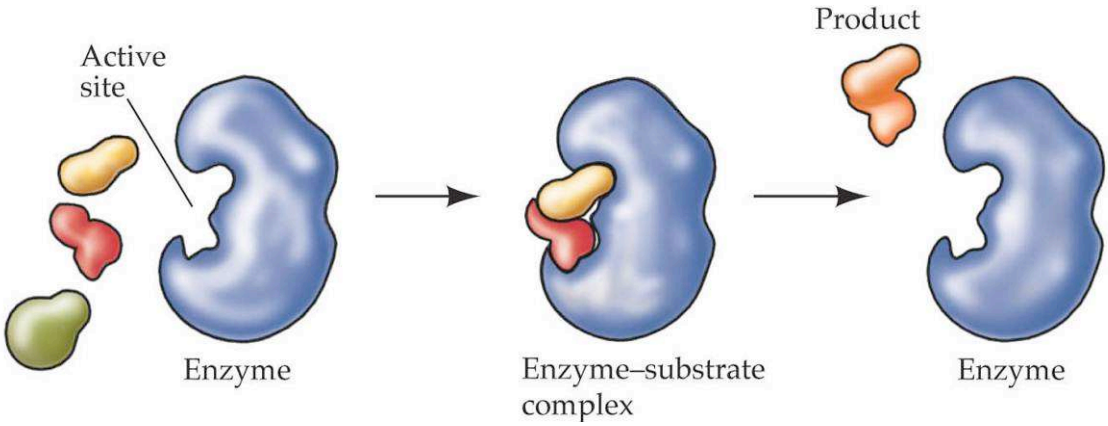


Figure 44 : Schématisation très simplifiée[56] du site actif d'une enzyme permettant la transformation de deux réactifs A et B en un produit C : *A + B -> AB -> C*.

La figure 45 présente deux autres schémas de sites actifs, avec des conventions de représentations différentes.

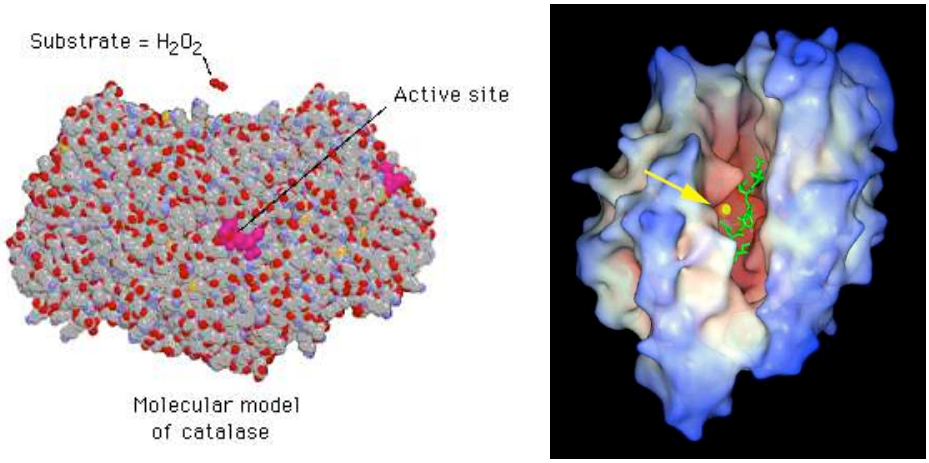


Figure 45 : Autres représentations de sites actifs[57].

Or ce sont les mêmes processus qui se produisent avec une information nouvelle à l'égard d'une conception donnée. Bien plus, le recours à l'analogie avec les protéines allostériques permet d'ajouter à la représentation une dimension supplémentaire : celle de l'inhibition, une propriété courante dans

[56] Pour une vision dynamique de l'image, consultez le lien http://tinyurl.com/3k5c7lv - Dernière consultation : 05/02/2013.

[57] Pour des visions dynamiques de réactions dans des sites actifs, consultez les liens http://tinyurl.com/4yul4lz et http://tinyurl.com/3jeqetq - Dernière consultation : 05/02/2013.

cette classe de protéines, et sur laquelle nous reviendrons après avoir caractérisé la notion d'heuristique dans le nouveau modèle, qui appelle elle aussi l'idée d'inhibition.

6.3.2. Chemins de pensée et heuristiques

6.3.2.1. Représentation

Pour pouvoir être traitée par un site actif, l'information doit avant tout y être dirigée après avoir été reconnue : c'est à ce stade qu'intervient la notion d'heuristique développée dans le paragraphe *3.4.3.5. Les chemins de pensée et le modèle-cadre SRK*. En l'occurrence, l'analogie entre conceptions et protéines permet bien d'imaginer l'existence de « chemins de pensée » modelés par l'agencement des conceptions et conduisant aux sites actifs évoqués plus haut, chargés du traitement de l'information. Dans le cadre de notre représentation, ces « chemins de pensée » prennent ainsi la forme de chemins véritables, sortes de tunnels au travers desquels l'information doit se frayer un passage, comme l'illustre la figure 46 (et notamment la vidéo associée, mentionnée en note de bas de page).

Figure 46 : L'heuristique allostérique : un « tunnel de pensée » vers le site actif (au centre de l'image)[58].

6.3.2.2. Modes d'action

Préexistantes ou élaborées en temps réel par l'individu se trouvant dans une situation nécessitant leur utilisation, ces heuristiques agissent conformément aux régimes de pensée décrits par Rasmussen : le mode S conduit à l'utilisation des plus accessibles, si elles sont reconnues comme pertinentes pour traiter l'information. Dans le cas où elles semblent seulement partiellement adaptées, ou proches de la démarche de pensée à effectuer, le mode R prédomine. Si elles sont inexistantes, elle doivent être construites de manière *ad hoc* c'est le mode K qui décrit le mieux la situation et justifie l'effort cognitif et le temps nécessaires pour traiter l'information.

Un exemple permet d'illustrer la complémentarité de ces trois modes d'action : dans le cadre des activités de *La Main à la Pâte*, lors d'une séance d'accompagnement scientifique à l'école primaire portant sur l'astronomie, un étudiant de l'école polytechnique fût pris au dépourvu lorsque l'enseignante lui demanda d'expliquer le mécanisme qui préside à l'alternance des saisons (figures 47a, 47b et 47c)[59].

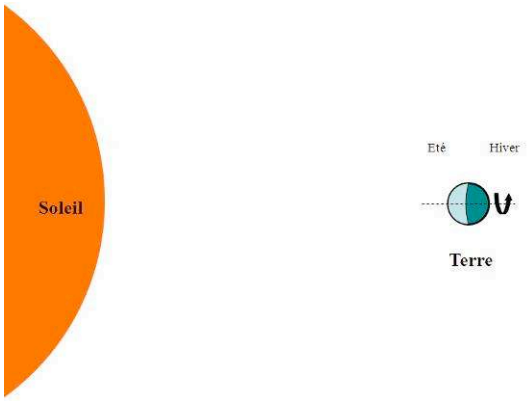
On rappelle que ces dernières ne sont pas dues à la forme (très peu) éliptique de l'orbite terrestre, mais à l'inclinaison de la Terre sur son axe de rotation sur elle-même, conduisant selon les périodes de l'année les deux hémisphères à être exposés à des rayonnements solaires rasants ou zénithaux.

---

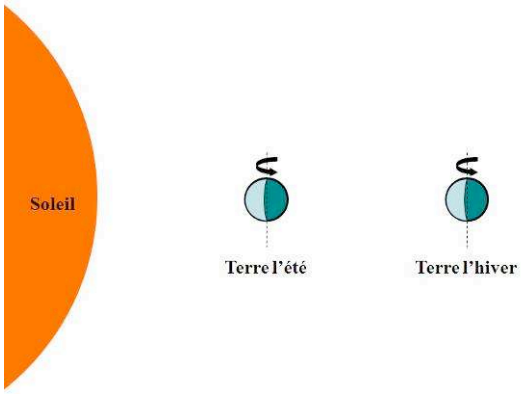
[58] Pour une vision dynamique de l'image, consulter le lien http://tinyurl.com/3vo2wta - Dernière consultation : 05/02/2013.

[59] Anecdote révélée par un des responsables de La Main à la Pâte ; correspondance personnelle (2004).

Très confiant dans ses connaissances, et bien que de manière un peu étonnante, il répondit rapidement en illustrant son explication par le schéma suivant. Une réponse qui illustre bien le biais cognitif**Erreur ! Signet non défini.** dans lequel peut entraîner l'activation du mode S, surtout lorsque l'heuristique employée est la première accessible.



Prenant conscience de l'air dubitatif de l'enseignante, l'étudiant se reprit, invoqua la forme elliptique de l'orbite terrestre et corrigea son schéma de la manière suivante : appliquant des « règles » connues dans un mode R, il proposait ainsi une approche corrigée, *a priori* opératoire, à un coût cognitif toujours relativement faible.



Après quelques instants de réflexion, et constatant peut-être la stupeur de son tuteur, il demanda à la classe d'oublier ce qu'il venait de dire et expliqua finalement le phénomène en invoquant l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre par rapport au plan de l'écliptique. Il rassemblait cette fois toutes ses connaissances et, dans le mode K, proposait enfin la version convenable.

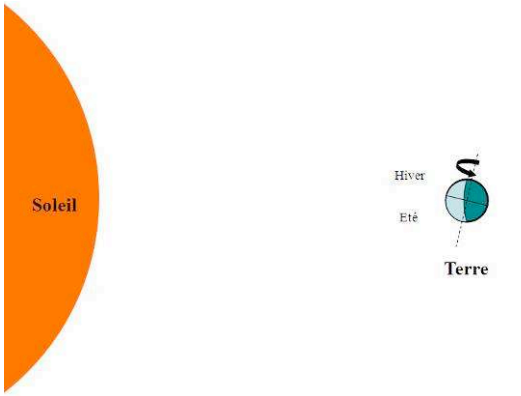


Figure 47 : Représentations fournies au tableau par l'étudiant et reproduite ici numériquement.

On peut considérer que, la plupart du temps, les heuristiques sont courtes, c'est-à-dire que les sites actifs sont très accessibles, et que les conceptions sont assimilables à ces derniers. C'est probablement ce qui fait que, dans la littérature didactique en général, et dans celle relative aux théories du changement conceptuel en particulier, aucune distinction n'est faite entre ces deux aspects du problème (la question de l'heuristique n'étant en général même pas abordée). Dans le cas de Mafalda évoqué plus haut, on peut notamment considérer que sa perception de la gravité est tellement prégnante que l'information qu'elle reçoit est traitée par une conception de ce type, précédée par un chemin de pensée très court. En revanche, on peut distinguer trois types de cas dans lesquels l'existence de l'heuristique a une importance :

1. Le premier est constitué de ces situations où le site actif est très enfoui et ne peut être atteint que par un effort de mémorisation destiné à retrouver la bonne méthode ; une situation que tout le monde expérimente régulièrement, par exemple au moment d'effectuer une règle de 3.

2. Le second correspond aux situations de type R et K de Rasmussen (ou *système 2* chez Stanovich & West), pour lesquelles ni l'heuristique ni la conception ne sont construites adéquatement : il arrive alors que l'heuristique construite sur le moment semble être adaptée au problème mais conduise finalement à un mauvais site actif ; un cas illustré par les biais de raisonnement (*représentativité*, *disponibilité*, *ajustement* et *ancrage*) décrits par Tversky & Kahneman dans leur célèbre article de 1974, plusieurs fois mentionné dans ce qui précède (et notamment au paragraphe *3.4.3.5. Les chemins de pensée et le modèle-cadre SRK*).
3. Le troisième tient à l'existence fréquente de plusieurs conceptions différentes, associées à des heuristiques semblant toutes permettre de conduire à un site actif valable. Dans ce cas-là, même si la conception associée au site actif pertinent est présente, il est possible qu'une mauvaise heuristique soit choisie, parce que plus accessible, plus plausible, plus économe… et qu'une mauvaise interprétation soit donnée. On perçoit l'intérêt d'un tel résultat du point de vue de l'enseignement, où les élèves sont souvent évalués en temps limité et en situation de stress. Nous aborderons ce point dans la section suivante, après avoir illustré ces différents cas avec l'exemple de l'expérience du croissant de Lune, déjà annoncé dans le paragraphe *4.3.1.2. Processus cognitifs : conceptions et heuristiques*.

6.3.2.3. L'expérience du croissant de Lune

Une expérience simple permet de mettre ces divers effets en évidence, et peut être réalisée dans n'importe quelle assemblée. Après avoir préparé son auditoire à répondre à sa question le plus rapidement possible, un animateur demande de préciser l'origine de la forme du croissant de Lune (éventuellement en en montrant l'image, comme sur la figure 48).

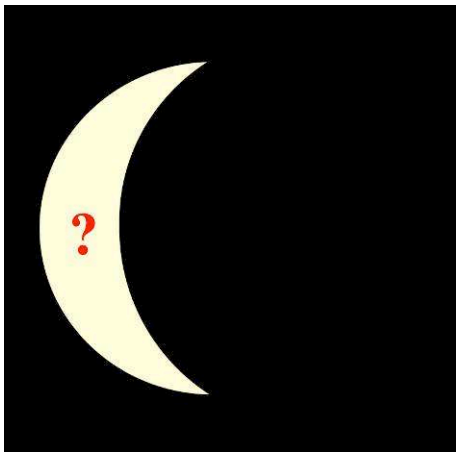


Figure 48 : Quelle est l'origine de la forme du croissant de Lune ?

Qautre types de cas se distinguent alors :

1. Les premiers connaissent très bien le problème et essayent d'expliquer l'effet de perspective dû à l'éclairage latéral de la Lune par le Soleil ;
2. Les seconds savent qu'ils savent et répondent (tout aussi vite que les autres, voire plus) que cette forme est due à l'ombre de la Terre portée sur la Lune ;
3. Les troisièmes ne savent pas trop et se laissent convaincre par la seconde interprétation (qui leur semble opératoire, la première étant de toute façon trop compliquée à saisir en quelques mots), lorsqu'on leur demande de se prononcer en levant la main ;
4. Les derniers ne savent pas du tout et s'interdisent de rien penser, si ce n'est qu'ils ne comprennent rien.

C'est le second cas qui nous intéresse, car ses représentants se divisent en deux populations :

- Les premiers illustrent le troisième cas du paragraphe précédent : ils connaissent la réponse exacte, savent qu'ils la connaissent et, pour cette raison, répondent rapidement. Puis, lorsqu'on leur fait réaliser leur erreur, ils se tapent le front en disant « *Mais bien sûr ! Quel idiot je fais ! Je le savais pourtant !* ». Dans ce cas, on ne peut pas parler de mauvaise conception à changer ; c'est bien davantage le réflexe de pensée qui est mauvais (comme dans le cas de la vache et du lait évoqué dans le paragraphe *3.4.3.6. Les mécanismes de l'inhibition cérébrale* ou dans celui de l'alternance des saisons décrit plus haut) et qui doit être corrigé.
- Les seconds n'ont aucune autre idée que cette interprétation liée à l'ombre de la Lune projetée sur la Terre : ils ne disposent donc que d'une seule heuristique, menant à une conception unique, inappropriée. Mais si, dans le cas précédent, cette heuristique si intuitive empêchait ceux qui avaient en eux la bonne réponse de choisir la bonne conception, il est évident qu'elle ne permet pas plus à ceux qui n'en disposent pas de remettre en question l'interprétation à laquelle conduit cette heuristique simpliste.

Dans les deux cas, c'est le choix initial de l'heuristique qui soit induit une réponse fausse alors que la bonne aurait pu être donnée, soit enferme dans une explication convaincante mais fausse. Cet exemple pose ainsi la question des raisons du choix d'une heuristique particulière plutôt que d'une autre, et donc de l'activation et de l'inhibition des heuristiques, mais aussi des possibilités de contrôle actif qu'un individu peut exercer sur elles. Ces points sont abordés dans les sections suivantes.

6.3.3. Fonctions d'optimisation

6.3.3.1. Fonction d'affinité $\Phi_{affin}(\tilde{\imath})$

Considérons une information particulière pénétrant l'espace des conceptions d'un individu, avec ses heuristiques et ses sites actifs disponibles (mode S), ajustables (mode R) ou potentiels (mode K). Considérons également la fonction $\Phi_{affin}(\tilde{\imath})$ décrivant l'affinité de l'information $\tilde{\imath}$ pour ces conceptions. Cette fonction, qui possède la dimension d'une énergie potentielle d'interaction, varie en fonction de la zone du savoir avec laquelle l'information interagit : haute énergie potentielle pour les faibles interactions, énergie potentielle minimale (et donc stabilité maximale) lorsque l'information a trouvé le site actif qui lui convenait le mieux. Si $x_1, x_2, \ldots, x_n$ sont les coordonnées décrivant les lieux du savoir visités par l'information $\tilde{\imath}$, alors $\Phi_{affin}(\tilde{\imath})$ est fonction non seulement de la nature de $\tilde{\imath}$, mais également de $(x_1, x_2, \ldots, x_n)$ [60].

- Un problème d'optimisation

Dans une situation donnée, le problème du traitement de l'information semble alors se résumer à un classique problème d'optimisation de la fonction $\Phi_{affin}(\tilde{\imath})(x_1, x_2, \ldots, x_n)$. En situation normale dans la vie courante, il est rare de disposer du temps nécessaire (et de l'envie) pour explorer toutes les situations : la démarche adoptée intuitivement relève au contraire du même type de stratégie que celle qu'adopte le joueur d'échecs, déjà évoquée dans le paragraphe *3.4.3.5. Les chemins de pensée et le modèle-cadre SRK*. Cette stratégie possède une règle locale consistant à minimiser la fonction $\Phi_{affin}(\tilde{\imath})$ dans un espace réduit du savoir, défini par la perception directe de la nature de l'information (comme dans le cas de Mafalda évoqué plus haut), par le contexte ou par la mise en œuvre active d'une *conception de reconnaissance* (voir la section *6.3.4. Accessibilité, contrôle et inhibition des heuristiques*). A partir d'un point $(x_1, x_2, \ldots, x_n)$ donné et si δ est le pas minimum du déplacement, il est possible de se

[60] On pourra s'étonner de ce que le nombre de coordonnées soit supérieur à 3 dans un espace de conceptions représenté de manière tridimensionnelle. On peut en effet imaginer que l'énergie d'interaction dépende non seulement des lieux visités par l'information $\tilde{\imath}$, mais également de son orientation ; un paramètre qui rajoute par exemple des degrés de liberté d'angles. Il faut par ailleurs se rappeler que cette visualisation n'est qu'une schématisation de la réalité, où les « coordonnées des lieux du savoir » doivent rester une abstraction et conserver une certaine généralité.

déplacer dans toutes les directions pour se retrouver dans l'une des positions : $(x_1+\delta, x_2, \ldots, x_n)$, $(x_1, x_2+\delta, \ldots, x_n)$, …, $(x_1, x_2, \ldots, x_n+\delta)$. Il est intéressant de constater que ce type de règle locale est justement l'une des définitions alternatives de la notion *d'heuristique* que nous avions indiquées au moment de son introduction dans le paragraphe *3.4.3.5. Les chemins de pensée et le modèle-cadre SRK.*

Intéressant et pas tout à fait étonnant, tant il est évident que, si l'optimisation locale de la fonction $\Phi_{affin}(\tilde{\imath})(x_1, x_2, \ldots, x_n)$ conduit la plupart du temps au traitement pertinent de l'information ĩ, il existe bien des cas où cette approche conduira à une conception inadaptée : les cas où, justement, il serait nécessaire de passer par une phase instable avant de parvenir au résultat. On retrouve les heuristiques et biais cognitifs de Tversky et Kahneman (1974), parfaitement illustré par ailleurs par l'exemple de la batte et de la balle de base-ball évoqué dans le paragraphe *3.4.3.5.* cité ci-dessus. Car comme nous l'avons vu alors, si la voie prise par le *système 1* paraît pertinente, le *système 2* sera rarement sollicité une fois le point $(x_1, x_2, \ldots, x_n)$ atteint pour vérifier que la valeur de $\Phi_{affin}(\tilde{\imath})(x_1, x_2, \ldots, x_n)$ est bien minimale et qu'il n'existe pas un point $(x_1', x_2', \ldots, x_n')$ où $\Phi_{affin}(\tilde{\imath})(x_1', x_2', \ldots, x_n') < \Phi_{affin}(\tilde{\imath})(x_1, x_2, \ldots, x_n)$.

Avec cette fonction $\Phi_{affin}(\tilde{\imath})(x_1, x_2, \ldots, x_n)$, nous disposons certes d'un outil formel, mais surtout d'une autre manière de visualiser la question du traitement de l'information par le savoir : car si $\Phi_{affin}(\tilde{\imath})(x_1, x_2, \ldots, x_n)$ est représentée sur un axe particulier dans un hyperespace de dimension n+1, dans la mesure où elle ne peut prendre qu'une seule valeur pour un jeu de paramètre $(x_1, x_2, \ldots, x_n)$, alors elle forme nécessairement une hypersurface de dimension n. La question de l'optimisation de $\Phi_{affin}(\tilde{\imath})(x_1, x_2, \ldots, x_n)$ revient donc à la recherche des puits d'énergie potentielle, un type de biais cognitif correspondant aux cas où des heuristiques font prendre localement une pente négative (descendante) vers un minimum d'énergie local qui ne correspond pas à la conception adaptée pour traiter l'information.

Une coupe verticale dans une de ces hypersurfaces, le long du chemin pris par le système information-conceptions, peut être représentée dépliée sur un plan : les deux cas évoqués ci-dessus sont représentés sur la figure 49.

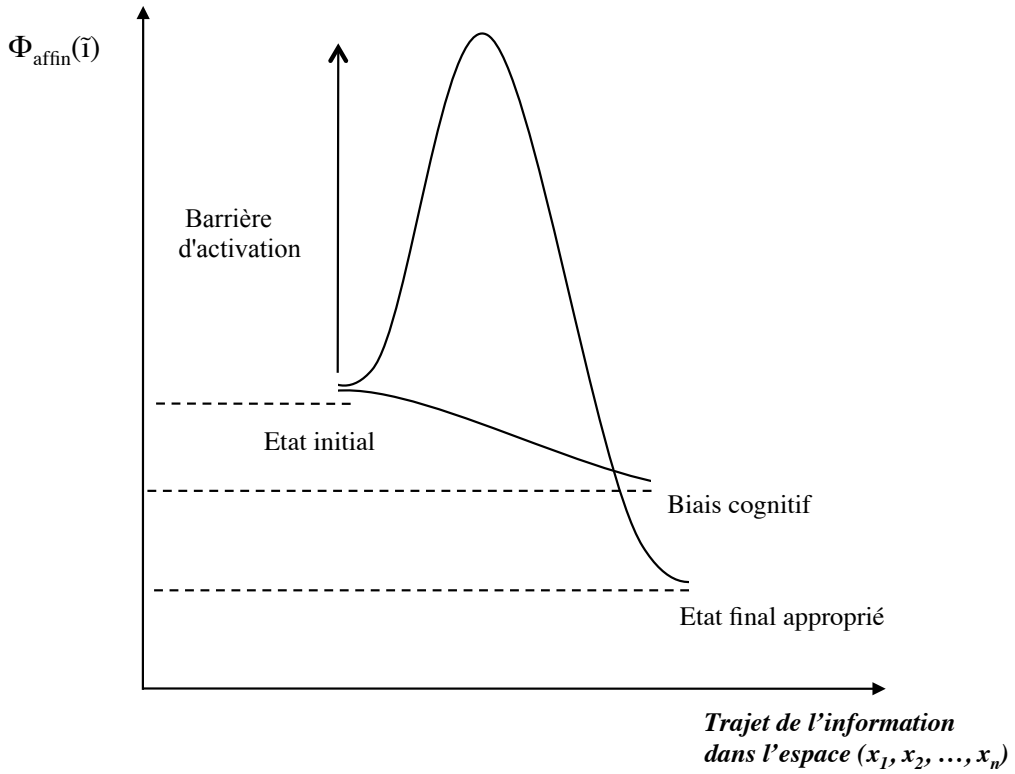


Figure 49 : Coexistence de deux heuristiques dont l'une, activée, conduit à un état plus stable évitant le biais cognitif.

Cette manière de visualiser ce type de fonction sera redétaillé dans la section *6.4.3. Fonctions d'optimisation et d'apprentissage* et dans les figures 61 à 63, au moment de la description de la fonction $\Phi_{réorg}$, dont la compréhension en sera encore plus importante puisqu'elle préfigurera le traitement théorique des processus d'apprentissage.

- La notion de « barrière d'activiation »

Quelles sont les raisons de l'existence de la barrière d'activation à franchir, comme dans le cas de la batte et de la balle de base ball ou de la forme du croissant de Lune ? La principale est une question d'accessibilité pour des raisons d'*encombrement* (les chimistes parleront d'encombrement *stérique* pour signifier qu'il est d'ordre physique et géométrique) : le schème de pensée à atteindre est probablement plus difficile à activer, car nécessitant plus de conceptions et de ressources mentales (dans l'exemple de la batte et de la balle, il s'agit en réalité ni plus ni moins que de résoudre de tête le système d'équations à deux inconnues : P+p = 1,1 et P-p = 1 !) que la simple opération réalisée par l'heuristique du *système 1* (p = 1,1 - 1 = 0,1). De plus, la résolution correcte ne pourra se faire, pour la plupart des gens, qu'en mode K (ce qui nécessite en outre une réorganisation des conceptions, comme nous le verrons plus loin), alors que la réponse erronée est fournie par le mode S.

La seconde raison nous est fournie par le retour à la visualisation de l'hypersurface représentative de la fonction $\Phi_{affin}(\vec{\imath})(x_1, x_2, \ldots, x_n)$: une heuristique conduit à une conception donnée par une voie généralement descendante, parfois temporairement montante, mais on imagine que l'information suit toujours le fond d'une vallée d'énergie potentielle : en d'autres termes, un déplacement latéral par rapport au chemin suivi, quelle qu'en soit la direction, conduit toujours à un accroissement d'énergie potentielle plus rapide que le long dudit chemin, rendant extrêmement difficile le passage spontané d'une heuristique à une autre.

- La notion de « souplesse »

Dès lors, un cas nouveau apparaît : celui qui est contraint non pas parce que la variation d'énergie potentielle le long du chemin est positive, mais parce que la vallée est transversalement si raide et étroite que l'information a du mal à y « passer ». Il s'agit là d'une autre forme de non accessibilité, liée cette fois non pas à l'*encombrement* mais à la *souplesse* du système information-conceptions (les chimistes parlent cette fois de facteur *entropique*). C'est notamment le cas pour le problème de la batte et de la balle de base-ball, qui présente les deux types de difficultés (*stérique* et *entropique*). En effet, ce cas de figure correspond aux cas où le problème doit être pris d'une manière extrêmement précise (et pas autrement), ce qui peut donner une impression de difficulté et, dans certains cas, orienter vers une autre heuristique dont la vallée est plus ample. Les deux cas sont représentés sur la figure 50.

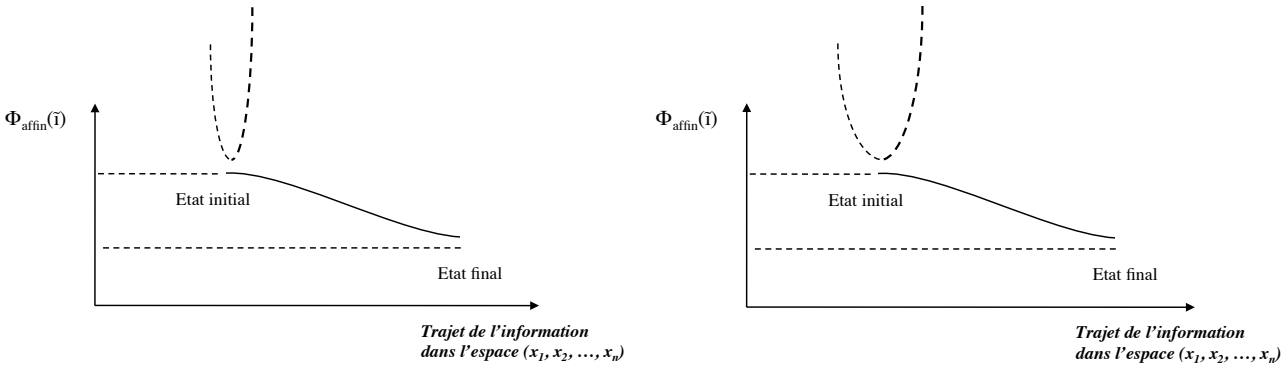


Figure 50 : Deux situations similaires d'un point de vue énergétique, mais non d'un point de vue entropique.

Dans la figure précédente, la courbe en traits pointillés est située dans le plan orthogonal à la feuille et représente une coupe dans la surface d'énergie potentielle (trait fort verts l'avant, trais léger vers l'arrière). La seconde heuristique sera préférée pour des raisons d'accessibilité liée à la souplesse du système.

Jusqu'ici, nous avons considéré l'information comme une entité rigide et définie extrinsèquement. En effet, une donnée, un fait, un schéma, le résultat d'une expérience, une phrase écrite ou prononcée, ont toujours une réalité concrète, exacte et bien définie. Mais à partir du moment où ils deviennent des événements ou phénomènes *perçus* par un individu, ils sont sujets aux interprétations qu'impose leur traitement par le filtre que constituent ses conceptions. Les paramètres évoqués plus haut (encombrement et souplesse déterminant la hauteur de la barrière d'activation et la courbure de la vallée) dépendent par conséquent non seulement de l'espace des conceptions, mais également de la nature du paquet d'information à traiter, c'est-à-dire de sa rigidité et de sa souplesse propres (sa capacité à être distordue) et de son encombrement (la quantité d'informations qu'il véhicule). L'affinité de l'information pour le réseau de conceptions dépend par suite donc non seulement des variations de $(x_1, x_2, \ldots, x_n)$ comme nous l'avons vu, mais également de celles de ĩ.

En d'autres termes, une information ne traverse pas « indemne » le réseau de nos conceptions : elle se déforme à leur contact, pour s'y adapter. Mais elle peut bien sûr également agir sur elles pour les transformer ; comme nous l'avons évoqué plus haut, la description qui précède ne concerne en effet que les traitements de l'information en mode S, et pas en modes R ou K, où l'espace des conceptions lui-même doit se réorganiser sous l'influence de l'information à traiter. Rendre compte du cas général pour tenir compte de ces deux aspects (déformation de l'information et réorganisation du savoir) nécessite donc de complexifier le problème.

- <u>Déformation de l'information et réorganisation du savoir</u>

Pour tenir compte du premier d'entre eux (la déformation de l'information), il serait possible d'introduire une fonction de déformation $\Omega_{déf}$ (ĩ) s'ajoutant à la fonction Φ_{affin} (ĩ)$(x_1, x_2, \ldots, x_n)$. Cette nouvelle fonction dépendrait exclusivement des déformations de ĩ, pour lesquelles il faudrait définir de nouveaux degrés de liberté, notés par exemple $(y_1, y_2, \ldots, y_q)$. Ainsi, la véritable fonction d'affinité de l'information (cette fois variable) pour le réseau de conceptions (encore fixe pour le moment) serait constituée par la somme Φ_{affin} (ĩ)$(x_1, x_2, \ldots, x_n)$ + $\Omega_{déf}$ (ĩ)$(y_1, y_2, \ldots, y_q)$. Une autre manière d'écrire cette fonction d'affinité globale serait dès lors de dire qu'elle dépend de $\Omega_{déf}$ (ĩ) en la notant plus simplement : Φ_{affin} (ĩ) ($\Omega_{déf}$ ĩ)$(x_1, x_2, \ldots, x_n)$, ce qui revient à intégrer $\Omega_{déf}$ (ĩ) dans la Φ_{affin} (ĩ) initiale.

Dès lors, autant simplifier encore davantage en considérant ĩ elle-même comme une variable : la nouvelle fonction d'affinité, qui tient compte cette fois des déformations de ĩ lors de son déplacement dans l'espace des conceptions, sera finalement notée Φ_{affin} (ĩ, $x_1, x_2, \ldots, x_n$) (ou Φ_{affin} (ĩ) lorsqu'il s'agira seulement de l'évoquer). Dans toute la suite, nous conserverons cette notation. Elle revient à décider de ne pas particulariser les déformations de l'information lors de son traitement cognitif : minimiser Φ_{affin} (ĩ) revient donc, pour l'apprenant, à trouver la meilleure vallée d'énergie potentielle tout en déformant l'information pour qu'elle s'y ajuste.

Toutes les courbes présentées plus haut restent les mêmes, mais en conservant à l'esprit que ĩ n'est plus figée. Une caractéristique fondamentale pour rendre compte du fait, comme le faisait déjà le modèle allostérique de 2002 (figure 19), qu'il arrive qu'une information soit déformée par les conceptions préexistantes alors qu'elle était conçue pour les faire évoluer. Il arrive toutefois que ce cas soit possible (sans quoi il n'y aurait jamais d'apprentissage), ce qui nécessite d'introduire une nouvelle fonction correspondant à la déformation (ou réorganisation) des schèmes de pensée. Parce que notre intérêt principal réside dans la description des processus d'apprentissage, et à l'inverse de la fonction $\Omega_{déf}$ (ĩ) qui n'aura existé que le temps de mentionner ses effets, la fonction de réorganisation jouera par la suite un rôle fondamental dans notre théorie.

6.3.3.2. Fonction de réorganisation $\Phi_{réorg}$

Ajoutons donc à l'énergie d'interaction Φ_{affin} une énergie $\Phi_{réorg}$ de réorganisation de l'espace des conceptions, cette dernière survenant dans les cas où l'information nouvelle provoque une déstabilisation en entrant en contradiction avec les conceptions préexistantes, le sujet ne disposant pas des heuristiques appropriées et utilisables spontanément (mode S ou *système 1*) : plus cette réorganisation est forte, plus l'affinité entre le système en réorganisation et l'information (en supposant qu'elle soit suffisamment robuste pour ne pas être déformée) devra être forte pour compenser cette déstabilisation.

L'énergie $\Phi_{réorg}$ ne dépend pas directement de ĩ, même si la transformation est induite par l'existence de ĩ : en effet, elle désigne la réorganisation de l'espace des conceptions indépendamment de l'interaction de ces dernières avec l'information. En particulier, $\Phi_{réorg}$ ne dépend plus de la « position » $(x_1, x_2, \ldots, x_n)$ de l'information dans l'espace des conceptions (et de ses interactions avec lui), mais seulement de la direction dans laquelle le savoir va évoluer, définie par des degrés de liberté totalement différents. Ce qui change à chaque pas, ce ne sont en effet plus des distances ou angles entre une information et des conceptions préexistantes et figées : ce sont cette fois des distances et des angles qui décrivent les conceptions, heuristiques et sites actifs eux-mêmes, que nous devons reconsidérer comme plastiques. Nous noterons $(\alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_p)$ ces degrés de liberté (sans qu'il y ait le moindre lien entre n et p).

Puisque l'espace des conceptions se réorganise, ses interactions avec ĩ changent aussi et Φ_{affin} devient elle aussi dépendante de $(\alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_p)$. La traduction du premier alinéa de ce paragraphe est alors qu'au point $(x_1, x_2, \ldots, x_n)$ où débute la réorganisation (et donc où $\delta\Phi_{réorg} > 0$ car il en coûte presque toujours de commencer à modifier la structure de ses conceptions), la variation de $\Phi_{affin}(\tilde{\imath}, x_1, x_2, \ldots, x_n, \alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_p)$ en fonction des α_i doit être négative (au moins à courte échelle et dans une direction) pour compenser l'effort à fournir. Une condition qui, en termes de dérivées partielles, se traduit par le fait qu'il existe au moins un α_i tel que :

$$\partial\Phi_{affin}(\tilde{\imath}, x_1, x_2, \ldots, x_n, \alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_p) / \partial\alpha_i \neq 0$$ [61]

Mais il est possible que des α_i soient corrélés et évoluent ensemble, soit parce qu'il sont indissociablement corrélés, soit parce que la variation de l'un est compensée par celle des autres. Dans ce cas, si le nombre de degrés de libertés corrélés est *m* et que nous les renumérotons de 1 à *m*, la condition est transformée en :

$$\Sigma_{(1\leq i\leq m)}\, \partial\Phi_{affin}(\tilde{\imath}, x_1, x_2, \ldots, x_n, \alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_p) / \partial\alpha_i \neq 0$$ [62]

Que se passe-t-il si aucune de ces conditions ne peut être atteinte ? Alors la déstabilisation nécessite une autre résolution ; on peut prévoir soit la déformation de ĩ, soit son rejet par l'apprenant. D'où l'importance prévisible de travailler avant tout, en tant qu'enseignant, sur la perception de la robustesse de ĩ pour éviter qu'elle ne puisse être déformée, ou de fournir plusieurs informations cohérentes procurant chacune une déstabilisation supplémentaire renforçant le caractère général de la dissonance cognitive. Puis de donner accès à l'apprenant à une vision de ce que pourrait être la conception reformulée et résultant de la transformation à opérer.

Dans la suite de l'étude de $\Phi_{réorg}$ et sauf mention contraire, nous considérerons que ces conditions sont réunies, de manière à ne nous intéresser qu'aux variations de $\Phi_{réorg}$ indépendament des risques de déformation ou de rejet de ĩ.

---

[61] Nous notons ≠ 0 et non pas < 0 car si la variation est positive par rapport à α_i, elle est négative par rapport à $-\alpha_i$.

[62] Si la décroissance ne se produit pas immédiatement mais à courte échelle : $\Sigma_{(1\leq i\leq m)}\, \Delta\Phi_{affin}(\tilde{\imath}, x_1, x_2, \ldots, x_n, \alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_p) / \Delta\alpha_i \neq 0$ où Δ représente une variation et non plus une différentielle. Idem pour ce qui est de la relation précédente.

6.3.3.3. Fonction de traitement cognitif $\Psi_{cog}(\tilde{\imath})$

La question de l'optimisation devient dès lors beaucoup plus délicate. En effet, il ne s'agit plus simplement de choisir un chemin optimisé sur une hypersurface figée : à chaque pas, la forme même de cette hypersurface est susceptible d'être modifiée, avec une stratégie qui n'est plus seulement de minimiser Φ_{affin} localement, mais de fabriquer la cuvette d'énergie potentielle la plus profonde possible en évitant de trop faire croître la fonction que nous définissons comme Ψ_{cog}, décrivant cette fois l'ensemble du système information-conceptions lors du processus de traitement cognitif de l'information, où :

$$\Psi_{cog}(\tilde{\imath}, x_1, x_2, \ldots, x_n, \alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_p) = \Phi_{affin}(\tilde{\imath}, x_1, x_2, \ldots, x_n, \alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_p) + \Phi_{réorg}(\alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_p)$$

On notera à nouveau que $\Phi_{réorg}(\alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_p)$ ne dépend pas de $\tilde{\imath}$, mais simplement de la direction dans laquelle le sujet fait évoluer ses conceptions ; un choix qui lui est propre et qui peut dépendre de la situation, de l'information perturbatrice, du moment choisi pour le faire, de son état d'esprit et de sa motivation, etc.

On comprend toute la difficulté de l'entreprise lorsqu'il s'agit de traiter une information tout en modifiant les outils qui permettent de le faire ; l'expression de Giordan « *Faire avec [ses conceptions] pour aller contre* » (2000) prend réellement tout son sens. Dans le cadre du *système 2*, on comprend encore mieux que précédemment pourquoi et comment des biais cognitifs peuvent apparaître : non seulement les sources d'erreurs et les difficultés (stériques et entropiques) évoquées plus haut subsistent, mais l'information elle-même peut modifier les conceptions et les heuristiques qui ont pour tâche de la traiter, dans une direction dont rien ne garantit qu'elle soit « juste », tout en se déformant elle-même.

D'un point de vue constructiviste et dans le cadre de la *métaphore de la maison* évoquée à la section *2.3.2.*, cela revient à construire un mur en pierres sèches en les piochant les unes après les autres dans un tas dont on n'a qu'une idée d'ensemble (sans connaître la forme de toutes les pierres), et en modifiant le mur tout en y ajoutant les pierres, pour leur permettre d'y trouver leur place. L'approche ne peut dans ce cas reposer que sur une heuristique locale d'optimisation, les seuls guides dont on peut disposer étant : 1/ la nécessité de faire monter le mur, 2/ le besoin de solidité du mur, 3/ la contrainte d'utiliser seulement les quelques pierres apparentes dans le tas et 4/ le souci de ne pas aller vers des configurations bloquantes.

C'est là que réside toute la difficulté des apprentissages, dans laquelle nous entrons de plain pied : car c'est bien en fournissant à ses élèves des informations destinées à modifier leurs conceptions que tout enseignant enseigne ; la question est alors de savoir comment faire en sorte qu'elles soient modifiées dans le « bon » sens, mais également de savoir comment faire en sorte qu'une fois modifiés, les nouveaux sites actifs et heuristiques subsistent et ne retrouvent pas leurs formes initiales. Une double question qui interroge à la fois les moyens de la transformation et les raisons de la stabilité des conceptions. C'est ce qui fera ultérieurement l'objet de la sous-partie *6.4. Transformations du savoir*.

6.3.3.4. Différents niveaux de description du savoir

Avec ces fonctions d'optimisation et les traductions sous forme de représentations graphiques, nous disposons à présent de plusieurs niveaux de description du savoir, qu'il convient de repréciser de manière à toujours garder à l'esprit à quel niveau on se situe. Une problématique qui n'est pas sans rappeler celle de la chimie où, d'un point de vue pédagogique, une grande difficulté consiste à permettre à l'élève de naviguer entre la représentation microscopique des molécules, leurs représentations iconiques, les grandeurs théorique qui en décrivent les comportements et enfin le niveau macroscopique sensible.

1. Le premier niveau est celui des fonctions d'optimisation décrites plus haut, lorsqu'elles sont formalisées à l'aide de degrés de liberté, d'énergies d'interaction, d'indices et de symboles mathématiques. Sous cette forme, nous avons vu (et verrons encore) qu'elles peuvent induire des réflexions intéressantes.
2. Le deuxième niveau est celui des représentations graphiques de ces fonctions d'optimisation dans des hyperespaces de dimensions n, p ou n+p, ou dans des coupes en 2 dimensions représentées comme des courbes d'activation (nous détaillerons mieux cette opération dans la figure 63).
3. Le troisième niveau est celui de la description allostérique du savoir, représenté sous la forme de conceptions-protéines où sites actifs et heuristiques traitent les informations.
4. Le quatrième niveau est fourni par les sciences cognitives d'une part, avec leurs descriptions de la nature et des comportements des structures cérébrales, et par les sciences de l'éducation d'autre part, avec leurs modèles plus empiriques et phénoménologiques. Un niveau au cœur duquel s'ancre le modèle allostérique appuyé sur les formalisations des niveaux précédents.
5. Le niveau supérieur de description, enfin, est ce que nous pouvons nommer le « réel », observable tel quel dans les situations quotidiennes ou pédagogiques (l'équivalent du « macroscopique » pour la chimie).

Selon les besoins, il est possible de se placer à chacun de ces niveaux pour décrire le savoir, et chacun d'entre eux est susceptible de fournir de nouvelles pistes de compréhension des processus d'apprentissage. Dans toute la suite, nous effectuerons la distinction à chaque fois que ce sera nécessaire, et en particulier dans les nouveaux environnements didactiques que nous introduirons dans la partie *7. Prévisions du modèle : implications et applications pédagogiques* et qui seront intégralement fondés sur cet étagement de niveaux descriptifs.

6.3.4. Accessibilité, contrôle et inhibition des heuristiques

Dans la section précédente, nous avons décrit les processus cognitifs de traitement de l'information comme l'optimisation locale de la fonction $\Psi_{cog}(\tilde{\imath}, x_1, x_2, \ldots, x_n, \alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_p)$. Il convient toutefois d'interroger cette « localisation ». Le choix d'un chemin de pensée se fait-il parmi toutes les heuristiques possibles, ou existe-t-il au contraire un contrôle supracognitif qui y effectue une pré-sélection ? Y a-t-il, en d'autres termes, une directionnalité dans l'optimisation de Ψ_{cog} ? Existe-t-il des heuristiques inaccessibles ou indisponibles ? Des expériences simples comme celle de la vache et du lait (figure 31), ou de la lettre B et du nombre 13 (figure 30), viennent conforter cette idée, que complètent les expériences sur l'inhibition de Houdé et la coexistence de croyances contradictoires chez nombre d'individus (scientifiques et religieuses, par exemple). Plusieurs cas distincts illustrent ces diverses situations.

6.3.4.1. La prééminence d'heuristiques particulières

- Des heuristiques libres

Certaines heuristiques sont toujours très accessibles, *stériquement* et *entropiquement*. Dans la figure 42c, elles seraient représentées en surface comme des chemins d'accès robustes (elles sont opératoires la plupart du temps et ne peuvent pas être modifiées facilement), et surtout très larges, libres et mobilisables facilement. Les trois heuristiques de Tversky et Kahneman (1974), la *représentativité*, la *disponibilité* et l'*ancrage-ajustement*, font partie de cette catégorie, mais il en existe bien d'autres, constituées notamment par toutes celles qui nous permettent d'appréhender notre environnement direct, effectuer des liens de cause à effet, des opérations algébriques simples, etc.

- La rémanence

Un effet de contexte particulièrement intéressant, et proche de l'ancrage de Kahneman, est celui de la rémanence d'une heuristique, qui est utilisée ou qui oriente une réponse parce qu'elle l'a été juste avant. Dans l'exemple de la vache et du lait, l'heuristique « blanc » est surutilisée ; liée à l'heuristique « lait », elle induit dans sa direction le traitement de la question « *Que boit la vache ?* » lorsque cette dernière survient à l'impromptu. On peut en effet supposer ne pas être dans le cas de la figure 49, la réponse à cette question ne présentant pas de barrière d'activation spécialement haute.

- Les effets de contexte

Plus intéressants sont les effets qui conduisent à utiliser une heuristique parce que l'esprit y a été conduit par un événement préalable (ou simultané). Dans l'exemple de la figure 30, c'est la reconnaissance du A et du C qui conduit à lire le signe intermédiaire comme un B, et la reconnaissance du 12 et du 14 qui conduit à le lire comme un 13. De même dans l'exemple du croissant de Lune, des interlocuteurs nous ont reproché d'avoir utilisé un schéma erroné, construit à l'aide de disques qui induisent la réponse fausse alors que la forme du vrai croissant de Lune aurait été moins trompeuse (figure 51) : c'est bien un effet de contexte qui s'ajoute à la présence d'une heuristique descendante (on parlera plus tard d'heuristique « non activée », au sens de l'existence d'une « barrière d'activation » à franchir) conduisant à une conception inadaptée à la situation, et représentée dans la figure 49.

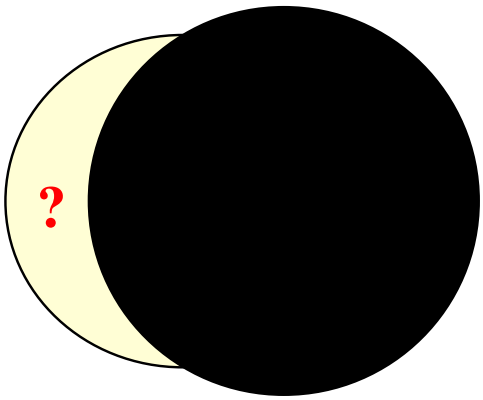


Figure 51 : Subterfuge (induisant un effet de contexte)
utilisé pour représenter le croissant de Lune dans l'expérience du même nom.

Dans le cadre de l'analogie allostérique, les effets de contexte se comprennent en réalisant que l'information finalement traitée par le site actif pour conduire à la réponse exprimée est accompagnée par d'autres informations qui, elles aussi, peuvent être reconnues par des zones de l'espace des conceptions vers lesquelles elles sont susceptibles d'attirer l'ensemble. Si $\hat{\imath}$ et $\hat{\jmath}$ sont deux informations successives ou liées, la fonction d'optimisation est alors constituée de la somme des fonctions d'optimisation de $\hat{\imath}$ et $\hat{\jmath}$, à laquelle s'ajoute l'énergie d'interaction entre $\hat{\imath}$ et $\hat{\jmath}$:

$$\Phi_{affin}(\hat{\imath}, \hat{\jmath}, x_1, x_2, \ldots, x_n) = \Phi_{affin}(\hat{\imath}, x_1, x_2, \ldots, x_n) + \Phi_{affin}(\hat{\jmath}, x_1, x_2, \ldots, x_n) + \omega(\hat{\imath}, \hat{\jmath})$$

Si $\Phi_{affin}(\hat{\imath}, x_1, x_2, \ldots, x_n)$ décroit rapidement dans une direction sans que $\Phi_{affin}(\hat{\jmath}, x_1, x_2, \ldots, x_n)$ ne croisse trop, alors il est possible qu'un effet de contexte apparaisse sur le traitement de $\hat{\jmath}$. C'est le cas de l'expérience décrite au paragraphe *3.4.3.6. Les mécanismes de l'inhibition cérébrale*, consistant à demander à un sujet d'indiquer les couleurs des mots suivants à voix haute : **VERT JAUNE ROUGE BLEU JAUNE VERT ROUGE BLEU**, $\hat{\imath}$ et $\hat{\jmath}$ étant respectivement la couleur vue et le nom de la couleur lu, où $\omega(\hat{\imath}, \hat{\jmath})$ est évidemment très forte.

Pour qu'il soit corrigé, il est nécessaire de séparer î et ĵ, c'est-à-dire de déstabiliser encore davantage le système, ce qui nécessite que $\Phi_{affin}(ĵ, x_1, x_2, \ldots, x_n)$ augmente largement plus que $\Phi_{affin}(î, x_1, x_2, \ldots, x_n)$ ne décroît, ou qu'une troisième information (apportée par exemple par un enseignant) vienne guider l'apprenant en apportant une stabilisation supplémentaire dans la direction pertinente du point de vue du traitement de ĵ. Dans l'exemple ci-dessus, l'instruction permettant de décorréler î et ĵ consistera par exemple à regarder les mots à l'envers.

L'effet d'amorçage négatif décrit par Houdé et évoqué dans le paragraphe *3.4.3.6. Les mécanismes de l'inhibition cérébrale* s'interprête de la même manière bien qu'il soit légèrement plus complexe : l'information î provoque une inhibition conduisant à la destabilisation locale de l'heuristique que devrait emprunter ĵ, ce qui, en vertu de la proximité temporelle des occurrences de î et ĵ, se traduit par une déstabilisation temporaire de $\Phi_{affin}(ĵ, x_1, x_2, \ldots, x_n)$. Nous y reviendrons un peu plus loin.

- Les heuristiques affectives

Ainsi désignées par Slovic (2002), ces heuristiques sont mystérieusement très prééminentes, à tel point qu'elles peuvent induire des comportements complètement irrationnels et qu'il faut parfois plusieurs heures à un individu pour relativiser la colère ou la douleur qu'il a ressentie à l'annonce d'un événement, qui serait considéré comme anodin pour d'autres. Un amant jaloux, par exemple, comme Paul dans le film *L'enfer* de Claude Chabrol (1994), peut voir dans tous les événements anodins des signes qui nourrissent sa névrose de la suspicion d'adultère : une remarque de sa femme, une plaisanterie, un sourire adressé à un inconnu… deviennent autant d'informations happées automatiquement par l'heuristique de la jalousie. Cet effet est si fort qu'il semble intervenir en amont des autres, et orienter le traitement de l'information vers une toute autre zone cognitive que la nature de l'information ne la destinerait normalement ; vers un autre « pli cognitif ». C'est pourquoi elles pourront être parfois considérées, comme nous le verrons plus loin, comme des heuristiques de contrôles, ou métaheuristiques.

6.3.4.2. Des heuristiques inaccessibles

- Des « plis cognitifs » disjoints

Une fois orientée vers un pli cognitif particulier, il est très difficile d'en faire sortir l'information pour faire appel à des conceptions d'un autre type. Les cas représentatifs les plus marquants de cet effet sont ceux dont on dit d'un individu qu'il « s'enferre » dans son jugement ou son interprétation. C'est ainsi qu'en 1992, lors de l'épreuve de physique du concours à l'Ecole Polytechnique, un étudiant invité à calculer la période des petites oscillations d'une cuiller dans une coupe de glace prit le pli cognitif consistant à chercher la solution dans l'application du principe fondamental de la dynamique, remplit le tableau noir de calculs, avant de se rendre compte (un peu trop tard) que la solution était évidente si l'on passait par l'utilisation de la conservation de l'énergie[63].

Dans l'analogie allostérique, ces plis apparaissent lorsque les conceptions correspondantes appartiennent à des régions éloignées dans l'espace des conceptions. Dans le formalisme supporté par la fonction $\Phi_{affin}(ĩ, x_1, x_2, \ldots, x_n)$, l'interprétation est tout aussi évidente : un pli cognitif apparaît lorsque, quelle que soit ĩ, la fonction Φ_{affin} présente une haute barrière à franchir pour passer d'une vallée à l'autre. « Enferré » dans la vallée qu'il a choisie, l'esprit ne distingue pas l'autre et persiste dans son erreur.

C'est encore le contexte initial, l'action d'un tiers ou une métaconception, qui induira le choix de la vallée ou le passage de l'une à l'autre ; dans le cas de la coexistence du « rationnel construit » et de « l'irrationnel présumé révolu » par exemple (Houdé, 1999), où selon la situation, un enfant pourra se comporter selon l'un ou l'autre. Pas seulement un enfant, d'ailleurs : un chercheur peut très bien

63 Notes autobiographiques.

présenter un comportement très méthodique dans le contexte de son laboratoire et, au moment de rentrer chez lui, sur le pas de sa porte, essayer irrationnellement ses clés dans n'importe quel ordre (au risque de tester plusieurs fois la même) parce que le contexte (une envie pressante par exemple) le pousse à la hâte.

- Des paradigmes de pensée contradictoires

Un autre cas concerne cette fois non plus des heuristiques inaccessibles dans le mode S ou R, mais des heuristiques et conceptions impossibles à élaborer compte tenu de la structure du savoir en place. Dans le cadre d'un paradigme de pensée considérant l'atome comme un petit modèle planétaire, par exemple (modèle de Rutherford, figure 52), il est impossible de construire la conception permettant de comprendre comment un électron 2p peut avoir une probabilité de présence non nulle près du noyau (et peut donc se trouver « plus près » de lui qu'un électron 1s) alors qu'il « gravite » sur une orbite plus lointaine.

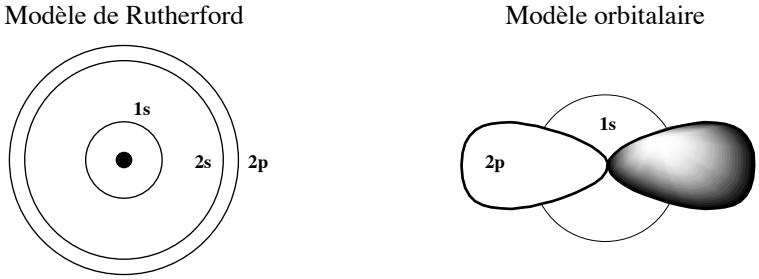


Figure 52 : De l'électron 1s et de l'électron 2p, lequel est le plus proche du noyau ?

De même les étudiants en chimie, lorsqu'ils abordent la notion d'orbitale atomique, ont encore une conception corpusculaire du cortège électronique ; c'est pourquoi il leur est difficile de comprendre « comment l'électron fait pour "passer" d'un côté à l'autre de l'orbitale π » (figure 53), ce qui oblige en effet l'électron à passer par un plan nodal où sa densité de probabilité de présence est nulle (parce que sa fonction d'onde s'annule).

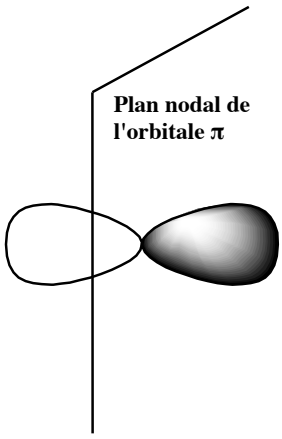


Figure 53 : La notion de plan nodal : « *Comment fait l'électron π pour passer d'un côté de l'orbitale à l'autre ?* »

Pour être en mesure de construire une nouvelle conception, et l'heuristique qui conduira au site actif approprié, il est nécessaire de modifier en profondeur les conceptions préexistantes ; en construisant le nouveau pli cognitif d'une part, puis en créant le tunnel ou le col permettant de passer facilement de

l'un à l'autre. Dans le cadre d'un apprentissage, cette transformation sera un objectif (on retrouve l'idée de déconstruction-reconstruction du modèle allostérique), mais dans le cadre de la simple analyse d'une information, l'énorme barrière d'activation à laquelle elle correspond sera tout simplement un obstacle à la compréhension, comme une réelle impossibilité d'atteindre le mode K. C'est ce qu'illustre humoristiquement la figure 54.

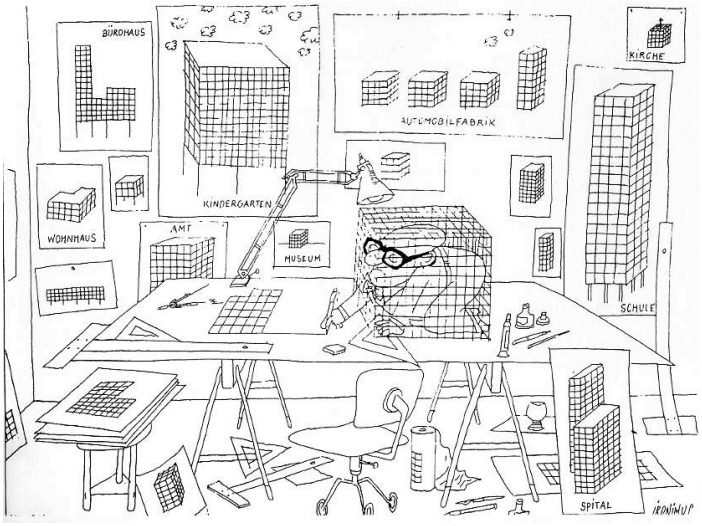


Figure 54 : Illustration humoristique de la notion de *paradigme de pensée*.

6.3.4.3. Des heuristiques indisponibles

Nous l'avons vu avec les travaux sur l'inhibition cérébrale : certaines heuristiques doivent être inhibées pour que, dans des situations où elles auraient tendance à intervenir de manière inadéquate, elles cessent d'être sollicitées au profit de conceptions plus appropriées. Cette inhibition est un processus d'apprentissage car elle s'acquiert avec effort, expérience et répétition, et à ce titre nous l'étudierons plus loin. Mais, de même que certaines heuristiques nécessitent d'être inhibées dans certaines situations, il est fort possible que d'autres qui ne devraient pas l'être le soient, préalablement à la réalisation d'une tâche. Dans l'expérience dite « de Galilée », consistant à faire tomber côte à côte deux balles de même diamètre mais de masses très différentes, les personnes éduquées scientifiquement ont appris à inhiber la conception selon laquelle la balle la plus lourde arrive en premier ; se souvenant de l'expérience du tube de Newton dans le vide, ils savent dire, avant que les deux balles ne soient lâchées : « *je me souviens qu'elles arrivent en même temps* ». Hélas, nous avons pu constater que cet « apprentissage » conduisait souvent à des généralisations indues, identifiables par exemple à des phrases du type : « *Elles arrivent en même temps car tous les objets tombent à la même vitesse* ». Trop inhibée, l'heuristique adéquate ne fonctionne plus dans les cas où elle le devrait tout de même, ce qui nécessite de transformer la *métaconception* qui effectue cette inhibition.

Le cas de l'amorçage négatif évoqué plus haut est un autre type d'inhibition. Cette fois, on ne peut plus parler d'apprentissage car l'inhibition est temporaire, locale et contextuelle.

Mais dans tous les cas, l'existence d'une conception bloquant une autre heuristique peut être illustrée par la figure 55, l'analogie allostérique étant particulièrement adéquate pour expliciter ces phénomènes. Les structures de protéines sont en effet si complexes que certaines voies métaboliques peuvent être bloquées par la présence d'un inhibiteur, parfois par une simple déformation conformationnelle, notamment dans le cas des protéines allostériques. Dans le cadre de notre représentation des conceptions par des protéines, cette idée est compatible avec le fait qu'une conception effectivement présente pourrait ne pas pouvoir être employée, faute de l'accessibilité nécessaire à son site actif.

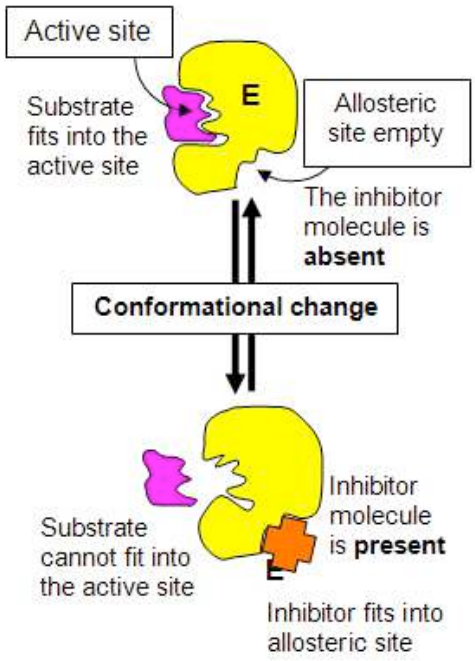


Figure 55 : Blocage d'un site actif par déformation conformationnelle induite par la présence d'un inhibiteur sur un autre site.

- Différentes modalités d'inhibition

Plusieurs modes de blocage de l'accessibilité d'un site actif peuvent dès lors être envisagés :

1. Le cas illustré par l'expérience de Galilée évoquée plus haut, suite à l'observation de laquelle les participants intègrent la règle « *tous les objets tombent à la même vitesse* », inhibant de ce fait l'idée de résistance de l'air, constituent un cas d'*inhibition non-compétitive* (figure 56a) où une *métaconception de contrôle* inhibe indirectement l'usage du site actif adéquat. Le site actif inhibé reste stable (car opératoire dans certains cas comme lorsqu'on passe la main à travers la vitre d'une voiture roulant sur l'autoroute) mais il est simplement inaccessible dans certaines situations.
2. L'occupation permanente du site actif par une information particulière, qui devient inhibitrice, est en revanche un cas d'*inhibition compétitive* (figure 56b). Pour l'illustrer, on prendra cette fois un exemple très différents des autres : celui d'une mélodie lancinante qui tournerait dans la tête d'un compositeur qui, ce faisant, ne serait pas capable d'écrire la moindre mesure de sa nouvelle création…
3. Il en va de même de la rigidification ou de la constriction d'une heuristique menant à un site actif donné, par un processus analogue à la déformation conformationnelle de la protéine de la figure 56b. C'est cette fois le cas où, devant « l'expérience de Galilée », les spectateurs appliquent la règle « *je me souviens qu'il ne faut pas dire ça* ». Parce que ces conceptions sont élaborées pour reconnaître les situations dans lesquelles *il ne faut pas* utiliser un site actif donné, elles peuvent être considérées comme des agents inhibiteurs d'un autre type que dans le cas n°2[64].

[64] Enfin, on pourrait parler « d'inhibition d'apprentissage » dans les cas où l'organisation des conceptions en place empêche structurellement la construction de nouvelles conceptions ou heuristiques. Un cas qui, parce qu'il relève de la rigidité des paradigmes de pensée, appartient toutefois à une toute autre catégorie que l'inhibition liée au traitement d'une information.

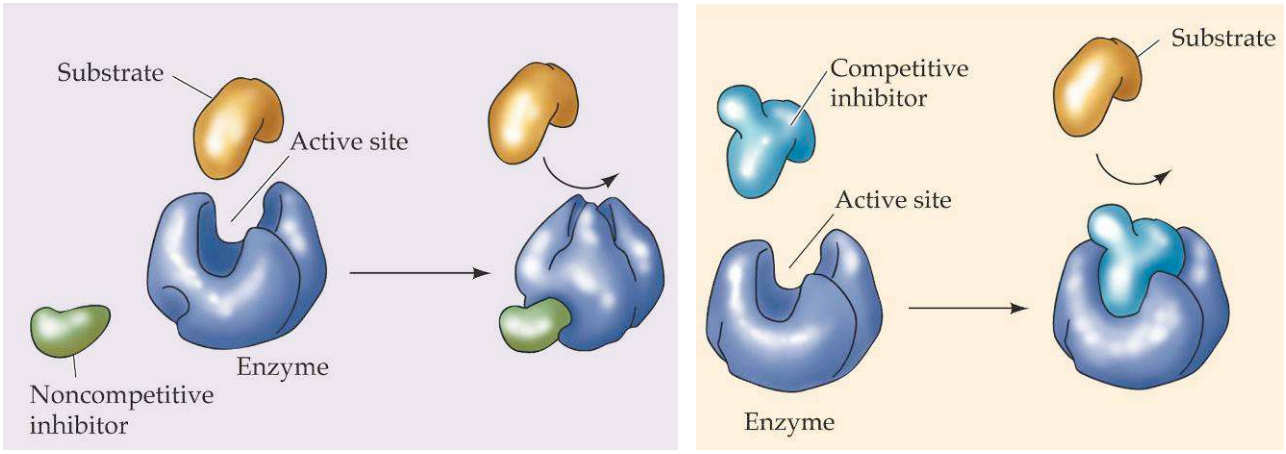


Figure 56 : Illustration des processus des inhibitions a/ non-competitive et b/ competitive.

- Traduction énergétique

En termes énergétiques, dans le cadre de la représentation hyperspatiale que nous avons faite de la fonction $\Psi_{cog}(\tilde{\imath}, x_1, x_2, \ldots, x_n, \alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_p) = \Phi_{affin}(\tilde{\imath}, x_1, x_2, \ldots, x_n, \alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_p) + \Phi_{réorg}(\alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_p)$ décrivant l'interaction entre une information et un espace de conceptions dynamique, ces deux types d'inhibition se traduisent respectivement par :

1. Dans le premier cas, une variation de $\Phi_{réorg}(\alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_p)$ induisant localement le resserrement de la vallée de l'heuristique inhibée dans sa dimension transverse (rigidification d'ordre entropique) ou de $\Phi_{affin}(\tilde{\imath}, x_1, x_2, \ldots, x_n, \alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_p)$ se traduisant par l'élévation de son niveau absolu (constriction d'ordre stérique), compensée par l'abaissement de l'énergie dans une autre région du savoir ;
2. Dans le deuxième et le troisième cas, une variation de $\Phi_{affin}(\tilde{\imath}, x_1, x_2, \ldots, x_n, \alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_p)$ induisant la disparition de la cuvette de potentiel correspondant à l'extrémité de ladite vallée puisque, le site actif étant occupé, il n'existe plus de possibilités d'interaction entre ce dernier et l'information à traiter. Cette variation positive est alors soit précédée par l'abaissement préalable de $\Phi_{affin}(\tilde{\imath}_{inhib}, x_1, x_2, \ldots, x_n, \alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_p)$, où $\tilde{\imath}_{inhib}$ est l'information inhibitrice, ce qui ne créée pas globalement de conflit cognitif, soit par l'abaissement de $\Phi_{réorg}(\alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_p)$ lorsque l'inhibition provient d'une *métaconception de contrôle*.

6.3.4.4. Des (méta)conceptions de contrôle

Bien heureusement, tous les cas de biais cognitifs évoqués ci-dessus sont remédiables (ou du moins l'enseignant doit-il avoir pour objectif d'y remédier). L'expérience de Houdé et Tzourio-Mazoyer (2003) décrite dans la figure 32, par exemple, montre comment il est possible d'inhiber activement et consciemment la mauvaise heuristique pour parvenir finalement à infirmer la règle « *S'il n'y a pas de carré rouge à gauche, alors il y a un cercle jaune à droite* ». L'inhibition, comme lors de la lecture des noms de couleurs écrits dans des couleurs ne correspondant pas au mot en question, a été décrite dans le tableau 4 comme étant de type *raisonnée* car elle fait appel au mode K.

De manière similaire, après s'être « fait avoir » avec la question de la vache et du lait, personne n'oubliera plus de réfléchir à deux fois avant de répondre (juste cette fois) : une inhibition que nous qualifiions alors de *décisionnelle*, car elle fait appel au mode R.

Enfin, dans les cas d'inhibition décrits dans le paragraphe précédent, il est en général possible de prendre conscience du problème et de corriger son erreur : quiconque pense que « *tous les objets tombent à la même vitesse* » parviendra facilement, une fois placé devant la chute simultanée d'une feuille de papier froissée et d'une autre restée plane, à réviser son appréciation et à réserver

l'heuristique correspondante aux cas tels que la chute dans le vide ou celle d'objets lourds tombant d'une faible hauteur (de manière à pouvoir négliger la résistance de l'air).

- Reconnaissance et orientation

Mais ces compétences supposent l'existence de conceptions bien particulières, que nous avons déjà nommées *métaconceptions de contrôle*, au sens du contrôle de l'interaction qu'une information nouvelle pourra avoir avec l'espace des conceptions, traduit par la *reconnaissance* qui en sera faite puis par son *orientation* vers une heuristique particulière. Ces conceptions spécifiques, qui ne sont rien d'autre que les *p-prims d'activation* de diSessa en 1993, possèdent une double fonction de reconnaissance et d'orientation : reconnaissance de la situation et orientation de l'information vers une heuristique donnée, transcendant les plis cognitifs et relativisant les effets de contexte ou de rémanence. Elles gèrent non pas la cognition, mais la métacognition ; c'est pourquoi nous les rangeons dans une catégorie de conceptions particulières, nommées *métaconceptions*. Comme nous l'avions annoncé dans le paragraphe *3.4.3.6. Les mécanismes de l'inhibition cérébrale (Les formes de l'inhibition)*, elles vont à l'encontre de la démonstration de Houdé (1998) selon laquelle le paradigme de l'*attention-activation* devrait être éliminé et remplacé par celui de l'*attention-inhibition* ; nous pensons au contraire que les deux mécanismes sont possibles et compatibles.

Comme nous l'avons vu, elles sont également capables d'inhibition, en interdisant l'accès à une heuristique reconnue préalablement comme inadéquate (parfois à tort d'ailleurs). On peut même leur attribuer dans certains cas une fonction de désinhibition : en reconnaissant une situation où le site actif a été inhibé compétitivement ou non, elles peuvent se lier à l'information inhibitrice pour la « décrocher » de l'heuristique qu'elle bloque, le gain énergétique apporté par cette liaison servant à compenser l'apport d'énergie nécessaire à la désinhibition. En termes concrets, ce type de cas se traduira alors par un état de conscience du sujet le conduisant par exemple à se dire : « *Ah oui, c'est vrai, ce n'est pas intuitif pour moi mais je me souviens que ce n'est pas ainsi que je dois procéder : certes l'expérience du tube de Newton me montre que tous les objets tombent à la même vitesse, mais cela se produit dans le vide seulement et ici, dans le cas des feuilles de papier en mouvement dans l'air, je dois réaliser que cette expérience n'est pas représentative du cas que j'ai rencontré et dont j'ai dû apprendre à me méfier* ».

Ces conceptions, que l'on peut représenter comme des sentinelles entourant l'espace des conceptions de la figure 42, sont innées ou créées lors de la construction de conceptions structurantes, ou encore ultérieurement. Comme toutes les autres, elles sont susceptibles d'être transformées à leur tour. Comme les autres également, elles sont munies d'heuristiques mais ces dernières, contrairement aux autres conceptions, sont « traversantes » : elles ne conduisent pas à un « méta site actif » mais à un pli cognitif particulier, ou à l'entrée d'une heuristique dont la barrière d'activation est peu élevée. En termes énergétiques, elles ont pour effet d'accompagner une information directement dans une vallée d'énergie potentielle particulière, plutôt que de la laisser trouver son chemin et explorer l'ensemble de l'hypersurface. Comme les autres, ces métaconceptions présentent des effets de rémanence ou de contexte, et peuvent être entraînées.

- Exemple

A titre d'illustration, la figure 57 (parmi bien d'autres dans la littérature des illusions d'optique) est particulièrement significative : à première vue, le dessin représente une femme nue de dos. Mais à bien y regarder, on s'aperçoit qu'il n'y a là que chat, pot de fleur, rideau, étagère, bas et verre. L'heuristique choisie initialement est celle qui nous fait voir la femme ; en revanche, une fois que le subterfuge a été reconnu, une métaconception de contrôle a été créée qui nous fait reconnaître l'image et détourner notre interprétation spontanée pour ne voir que ce qu'il y a à voir (ou ce que le dessinateur a voulu que nous ne voyions pas dans un premier temps). Il est certes toujours possible de voir la femme ; l'heuristique correspondante n'a pas été détruite ; mais elle a été « reconnue » comme non pertinente.

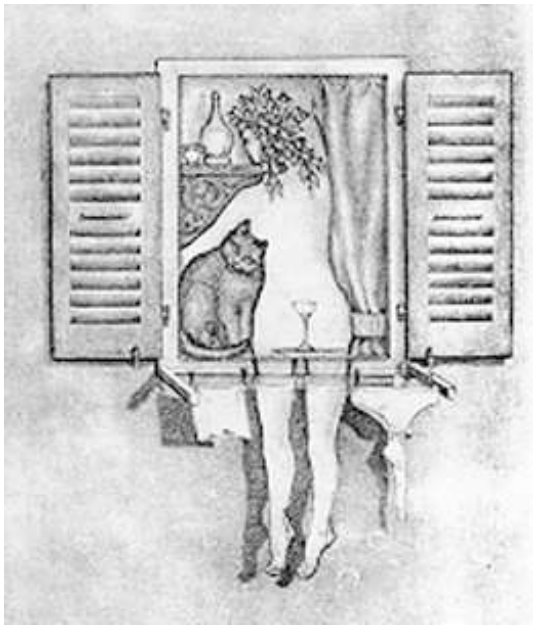


Figure 57 : Un exemple d'heuristique contrôlée par une métaconception après une phase d'apprentissage.

Ces *métaconceptions de contrôle* peuvent sembler anecdotiques ; pourtant elles permettent d'imaginer une nouvelle dimension aux processus d'apprentissage. Désormais, pour apprendre, il faudra parfois simplement restructurer ses *métaconceptions*. Une idée déjà effleurée par Posner *et al.* (1982) avec leur « écologie conceptuelle » qui suggérait une certaine diversité dans les types de conceptions.

6.3.4.5. Synthèse

L'analyse des divers processus de traitement de l'information nous a conduits à décrire une grande variété de biais cognitifs possibles, qui sont autant d'écueils à la compréhension du monde et de paramètres sur lesquels agir pour apprendre. Le tableau 7 tente de les résumer.

Choix d'une mauvaise heuristique	Encombrement stérique de l'heuristique adéquate Effet entropique contraignant sur l'heuristique adéquate Création d'une nouvelle heuristique inadéquate
Inaccessibilité / indisponibilité de l'heuristique adéquate	Inhibition de l'heuristique adéquate, compétitive ou non Effet d'amorçage négatif Blocage dans un pli cognitif inapproprié
Mauvaise orientation de l'information	Contexte (rémanence / information perturbatrice) Rôle inadapté d'une métaconception
Paradigme de pensée inadapté	Heuristique impossible à créer

Tableau 7 : Synthèse des diverses catégories de biais cognitifs possibles.

6.3.4.6. Contrôle cinétique et contrôle thermodynamique

Dans tout ce qui précède, nous avons toujours suggéré qu'une fois l'information dirigée vers un site actif donné, elle y demeurait, expliquant ainsi les biais cognitifs représentés dans le tableau 7. Il convient toutefois de nuancer cet implicite, dans la mesure où la réaction à une donnée nouvelle est

toujours révisable et parce que, si le résultat de son traitement ne semble pas pertinent à celui qui l'a produit en utilisant une heuristique inadaptée, il lui est bien entendu possible de revenir en arrière pour tenter une autre approche.

Ainsi, après avoir répondu « *Du lait* » à la question « *Que boit la vache ?* », n'importe qui est susceptible de se rendre compte de son erreur et de rectifier : « *Euh… de l'eau !* ». En d'autres termes, lorsque la fonction $\Psi_{cog}(\tilde{\imath}, x_1, x_2, \ldots, x_n, \alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_p)$ a atteint un minimum local, il reste possible d'en repartir.

La première raison est que, une fois transmise par une heuristique à un site actif, l'information ĩ est transformée en une *réponse* ř, et que cette réponse ř devient à son tour une information dont s'emparent les *conceptions de contrôle*, qui la dirigent vers les heuristiques libres où elle est analysée par des conceptions fiables. Dès lors, si elle entre en contradiction avec ces dernières (et le processus peut prendre un peu de temps), le conflit cognitif qui survient conduit nécessairement à la remise en question de la manière dont l'information ĩ a été traitée. Dans ce cas, de deux choses l'une : soit le traitement semble avoir été correct et la nouvelle information ř est susceptible d'entraîner la réorganisation des conceptions qu'elle a heurtées, soit il est remis en cause et une autre heuristique est sollicitée, et ainsi de suite jusqu'à ce qu'une solution stable soit trouvée.

En mode S ou en situation de stress, c'est-à-dire si l'on s'arrête à la première réponse donnée, l'état obtenu est contrôlé par les heuristiques puisque la réponse ř n'a pas eu le temps d'être analysée. Lorsqu'il s'agit de réactions chimiques, le cas analogue est caractérisé par une voie privilégiant une plus grande réactivité au moment de l'interaction des réactifs, et pas forcément les produits de réaction les plus stables : on parle alors de *contrôle cinétique*. Un terme que nous utiliserons également pour décrire les processus cognitifs.

En revanche, si le temps est laissé au sujet pour analyser les réponses produites par ses réflexions, l'état obtenu est cette fois contrôlé par les sites actifs. En chimie, on parlera de *contrôle thermodynamique* lorsque, de manière analogue, les réactifs ont eu le temps d'explorer les diverses voies réactives pour conduire aux produits les plus stables (et non plus les plus rapidement obtenus).

En synthèse chimique, il existe des cas très particuliers où la voie la plus rapide conduit aux produits les moins stables, et réciproquement (figure 58). On joue alors sur les conditions extérieures pour obtenir telle ou telle composition finale : température élevée et temps long pour le contrôle thermodynamique, basse température et temps court pour le contrôle cinétique.

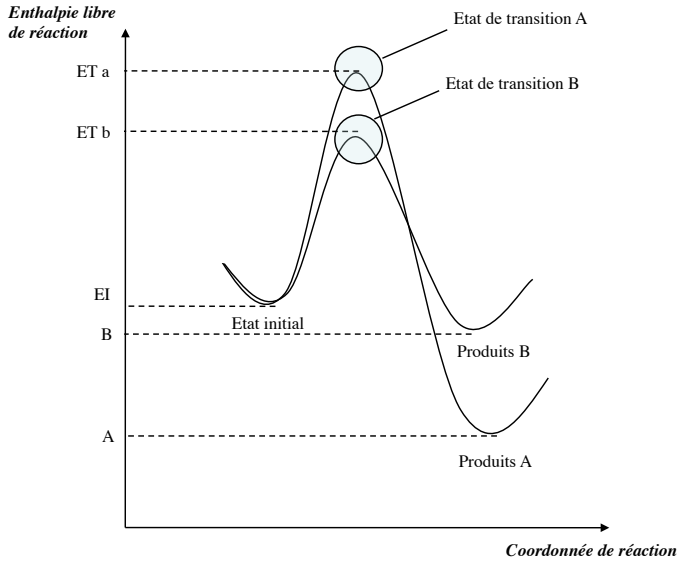


Figure 58 : Voies parallèles conduisant, sous contrôle cinétique et sous contrôle thermodynamique, à des produits différents.

Si le temps joue le même rôle au niveau des processus cognitifs, quel est l'analogue de la température ? La température est ce qui permet, en chimie, de fournir aux réactifs l'énergie cinétique nécessaire pour que les chocs intermoléculaires leur permettent de franchir la barrière d'activation correspondant à la rupture des premières liaisons, nécessaire à l'établissement ultérieur de liaisons nouvelles et conduisant à la restabilisation du système. Dans le cas qui nous intéresse, nous proposons que l'équivalent consiste en l'effort que l'on est prêt à mettre dans le traitement de l'information ou, en d'autres termes, en la quantité de ressources cognitives que l'on est prêt à mobiliser à cette fin. En effet, c'est par paresse cognitive que l'on répondra que la forme du croissant de Lune est due à l'ombre de la Terre ou que le prix de la batte de base-ball est de $1. C'est par paresse cognitive également que l'accompagnateur polytechnicien, face à la question imprévue des phases de la Lune, a produit des dessins totalement faux. Sweller (1991) parle à ce sujet de *minimisation de la charge cognitive*.

Il est également nécessaire, sous contrôle thermodynamique, que le système considéré (réactifs chimiques ou complexe information-conceptions) ait le temps d'explorer le plus de voies possibles. Dans le cas cognitif, il sera donc favorisé par les échanges avec des tiers, ce qui est en totale conformité avec le modèle socioconstructiviste qui encourage les interactions sociales pour apprendre.

Ainsi, on favorisera les réponses sous contrôle cinétique (c'est-à-dire gouvernées par les heuristiques) dans les situations laissant peu de temps de réflexion, interdisant les interactions sociales et pour lesquelles l'apprenant dispose de peu de motivation. Des caractéristiques qui se retrouvent justement dans la plupart des évaluations scolaires… A l'inverse, le contrôle thermodynamique (gouverné par les sites actifs) interviendra grâce aux échanges longs et à la résolution des problèmes motivants, ce que de trop rares actions pédagogiques telles que les TPE à l'école secondaire, les TIPE dans les classes préparatoires ou l'*apprentissage par projets* dans les écoles d'ingénieurs valorisent avec raison.

Au niveau cognitif, nous avons évoqué des cas où contrôle cinétique et contrôle thermodynamique ne conduisaient pas aux mêmes résultats (figure 58). Précisons que dans la plupart des cas cognitifs, contrairement à la chimie, c'est le contrôle thermodynamique qui conduit à la solution la plus souhaitable (sauf lorsqu'une conception erronée produit une situation plus stable que la conception à laquelle menait l'heuristique la moins activée, ce qui peut bien sûr arriver de temps en temps). Au moins conduit-il à la solution la plus « réfléchie », c'est-à-dire celle dont le traitement didactique, si elle est fausse, est susceptible d'avoir la meilleure efficacité en termes de réorganisation des conceptions. Peut-on espérer alors qu'il soit toujours possible de créer des conditions propices au contrôle thermodynamique ?

La différence fondamentale entre les deux systèmes, chimique et cognitif, est que dans le premier cas, la température est imposée de l'extérieur alors que dans le second, la motivation, la prédisposition à l'effort et la confiance en sa capacité à évoluer sont produites par l'individu lui-même (souvent avec difficulté). Par suite, si une solution satisfaisante a été trouvée à l'aide d'une heuristique adaptée, il est rare que celui qui l'a produite la remette en question si elle ne heurte pas spontanément ses autres conceptions. C'est notamment ce que Kahneman décrivait dans sa conférence Nobel (2002) en mentionnant le fait troublant que dans le questionnaire sur les prix de la batte et de la balle de base-ball, les étudiants de Princeton qui se trompaient étaient nombreux à se satisfaire de leur réponse fausse. Dans ces conditions, même avec du temps et de la motivation, rien ne remplacera le rôle d'accompagnement et de stimulation/perturbation que pourra apporter l'enseignant ou les pairs, pour favoriser l'exploration de toutes les voies cognitives possibles.

Dans cette sous-partie *6.3. Représentation des processus cognitifs*, nous avons étudié des situations dans lesquelles l'information est traitée par un savoir préexistant, éventuellement incité à se transformer légèrement (dans les modes R et K) mais où, parce que les réponses sont toujours exigées rapidement, elles sont essentiellement produites sous contrôle cinétique et où, par suite, les biais cognitifs observés sont liés aux heuristiques et métaheuristiques. Ces éléments fournissent autant de

pistes pour comprendre comment favoriser l'apprentissage en transformant les heuristiques pour corriger ces biais. Mais ces erreurs de réflexes ne sont pas les seuls obstacles à la compréhension du monde : la structure même des conceptions et de leurs sites actifs, comme nous l'avons vu dans la sous-partie *6.2. Structure et organisation du savoir*, se construisent de manière erratique, mouvante, au gré des expériences et des intuitions, avec leurs heuristiques associées. Certaines sont pertinentes, d'autres erronées ; certaines subsistent, d'autres pas ; et du point de vue de l'enseignant, celles qui subsistent ne sont pas nécessairement les bonnes. L'étude des raisons pour lesquelles elles subsistent et des processus régissant leurs transformations fait l'objet de la sous-partie suivante.

6.4. Transformations du savoir

6.4.1. Apprendre…

6.4.1.1. Un espace de conceptions ouvert

Comme nous l'avons vu plus haut, une conception erronée dans une situation donnée peut très bien s'avérer pertinente dans un problème différent. Il n'est donc pas question d'effacer ses conceptions dès qu'elles s'avèrent non opératoires. Apprendre, outre la création de conceptions nouvelles à partir d'éléments cognitifs de base, consiste alors en la modification du savoir préexistant, de ses règles d'orientation, de sa souplesse, de ses inhibitions, des stabilités relatives des conceptions qui le constituent. Autant d'éléments, vus dans la sous-partie précédente, qui permettront de préciser l'idée de « déconstruction-reconstruction » qui se trouve au cœur du modèle allostérique de l'apprendre. Mais auparavant, il semble important de régler une question délicate. S'il est possible de créer une conception nouvelle, peut-il arriver qu'une conception ancienne soit définitivement détruite ?

Si elle est suffisamment déstabilisée pour ne plus être accessible dans l'espace de conceptions d'un individu, ou irréversiblement inhibée, on peut la considérer comme supprimée de ses outils cognitifs disponibles. Mais d'une certaine manière, toute conception est susceptible d'être (re)forgée ou (re)sollicitée pour traiter une information donnée. A cet égard, on peut comparer l'espace des conceptions à l'univers, dont on dit qu'il est un espace fini mais illimité : toutes les conceptions y ont théoriquement leur place mais nombre d'entre elles sont inatteignables. Une conséquence directe de cette constatation est fondamentale : on peut toujours désapprendre ce que l'on a appris, en oubliant l'usage de certaines conceptions élaborées et en laissant resurgir les anciennes conceptions naïves.

Certes, on peut considérer qu'il est possible de détruire les fonctionnalités des métaconceptions qui orientent une information vers une heuristique donnée, ou les capacités d'interaction d'une heuristique avec une information particulière (fut-ce au prix de son inhibition). Mais il s'agit là de la destruction de propriétés cognitives par le biais de la transformation des structures de pensée, et pas de la suppression de ces dernières.

Un exemple concret peut illustrer ce propos : en 1978, un enfant apprend à lire[65]. Dans leur salle de bain, ses parents disposent d'une armoire à pharmacie de la marque *Espace*. L'enfant, qui cherche à déchiffrer tous les mots qui passent à sa portée, surtout s'ils sont isolés, tente de comprendre ce mot plusieurs fois par jour, mais il ne saisit pas la signification du mot qu'il entend comme [œspak]. Après plusieurs semaines (ou mois), il apprend à l'école qu'un « c » placé devant un « e » se prononce [s]. Et un jour, devant l'armoire à pharmacie, il a une illumination et comprend que le mot qu'il essaye de lire se prononce [espas]. Cet enfant a « appris » ; mais il n'a pas pour autant supprimé la conception qui lui faisait prononcer [k] la lettre « c ». Il la prononce toujours [k] dans le mot « cuisine », et ne la prononce pas davantage [s] dans le mot « pace » parce qu'il a appris que des règles d'utilisation différentes de sa conception s'appliquent aux différentes langues, telles que, ici, l'italien.

De même, la phrase « *Jean put dire comment on tape* » n'a pas le même sens en anglais et en français. C'est le contexte qui permet de la lire mais dans tous les cas, aucune conception n'est supprimée.

---

65 Notes autobiographiques.

Ce qui semble donc se produire, c'est bien davantage la préservation de toutes les conceptions possibles, ou du moins de la possibilité de les construire en mode R ou K, mais associées à une stabilité plus ou moins importante. Ainsi, une conception stable, dont l'heuristique est courte, large, accessible et disponible, pour laquelle existent des conceptions d'orientation elles-mêmes stables et disponibles, sera utilisée prioritairement à toutes les autres ; mais cela ne signifiera pas que les autres aient disparu.

Dans toute la suite, nous considérerons donc l'idée de « déconstruction » comme l'ensemble des modes de « réorganisation » possibles du savoir. Un choix qui justifie d'ailleurs l'introduction de la fonction $\Phi_{réorg}$. Dès lors, il est important de catégoriser ces différentes manières de réorganiser le savoir, au vu des différents cas que nous avons développés dans la sous-partie précédente.

6.4.1.2. Retour sur le modèle allostérique

La description que nous avons faite du savoir et des processus cognitifs liés au traitement de l'information nous amène à revisiter le modèle allostérique de l'apprendre de 2002, tel qu'il était présenté à la figure 19. L'*apprendre* y était en effet considéré comme le « passage d'une conception 1 à une conception 2 », ce « passage » prenant la forme d'un processus de « déconstruction-reconstruction ». Nous pouvons désormais préciser à la fois cette idée de « passage » et la nature des entités susceptibles d'être affectées par le processus de transformation des conceptions évoqué dans le paragraphe *4.3.1.6. Transformations du savoir*.

En effet, ce qui peut être transformé lorsqu'on apprend, ce peut être aussi bien un schème de pensée tout entier s'élaborant à partir de conceptions préalables, qu'un site actif dont on modifie les propriétés. Ce peut être également une heuristique, que l'on rend plus accessible, que l'on inhibe ou désinhibe. Ce peuvent être encore les métaconceptions et leurs heuristiques propres, dont on change les propriétés de reconnaissance et d'orientation de l'information. Nous verrons plus loin, et notamment dans les sous-parties *6.5. Stabilisation du savoir* et *6.6. Conséquences : de nouveaux leviers d'action pour apprendre*, d'autres formes de modifications du savoir pouvant être considérées comme relevant de l'apprentissage, tels que l'« assouplissement » ou la « stabilisation » du savoir, sans modification fondamentale de sa structure.

L'idée de « passage » de l'état 1 à l'état 2 mérite dès lors elle aussi d'être explicitée. Dans une perspective néo-piagétienne constructiviste, on visualiserait volontiers le changement comme une substitution d'entités correspondant à l'état 1 par d'autres entités correspondant à l'état 2. Au contraire, de par ce qui précède, on doit plutôt le considérer, pour l'apprenant, comme *l'émergence d'une possibilité nouvelle de traitement de l'information, réalisée par la modification structurale des schèmes de pensée préexistants ou par celle des règles régissant leur utilisation*. En d'autres termes, ces nouvelles structures de pensée et leur nouvelle opérationnalité doivent certes être élaborées à partir de celles du savoir préexistant, mais rien ne garantit qu'elles subsisteront ou seront toujours employées à bon escient ; on ne peut donc pas parler de « substitution ».

S'il fallait trouver une image, on pourrait recourir à celle des anciennes cartes perforées, que l'on glissait dans une machine en fonction de ce que l'on souhaitait lui faire faire. Dans le cadre de cette métaphore, apprendre, ce serait alors fabriquer une nouvelle carte ou en modifier une ancienne (en y perçant un trou, en en bouchant un autre…), la munir d'un signet puis la placer dans la pile des cartes utilisables en attendant l'occasion de s'en servir… ou pas. L'image est certes inappropriée pour décrire tous les aspects des processus d'apprentissage, mais elle rend bien cette idée de « possibilité nouvelle de traitement de l'information ».

Quoi qu'il en soit, dans tous les cas d'apprentissage évoqués ci-dessus, on continue de passer d'un « état 1 » à un « état 2 », ce dernier découlant du premier par une transformation du savoir préexistant (figure 59). A chaque fois, puisque les conceptions sont constitutives de l'ensemble du savoir et contiennent les sites actifs et leurs heuristiques, on pourra considérer que l'on passe de l'utilisation

d'une conception 1 à celle d'une conception 2 (et continuer à employer la figure 19, plus explicite que la figure 59), mais il nous faut désormais conserver à l'esprit la diversité des types de transformations que peuvent subir ces conceptions 1 et 2.

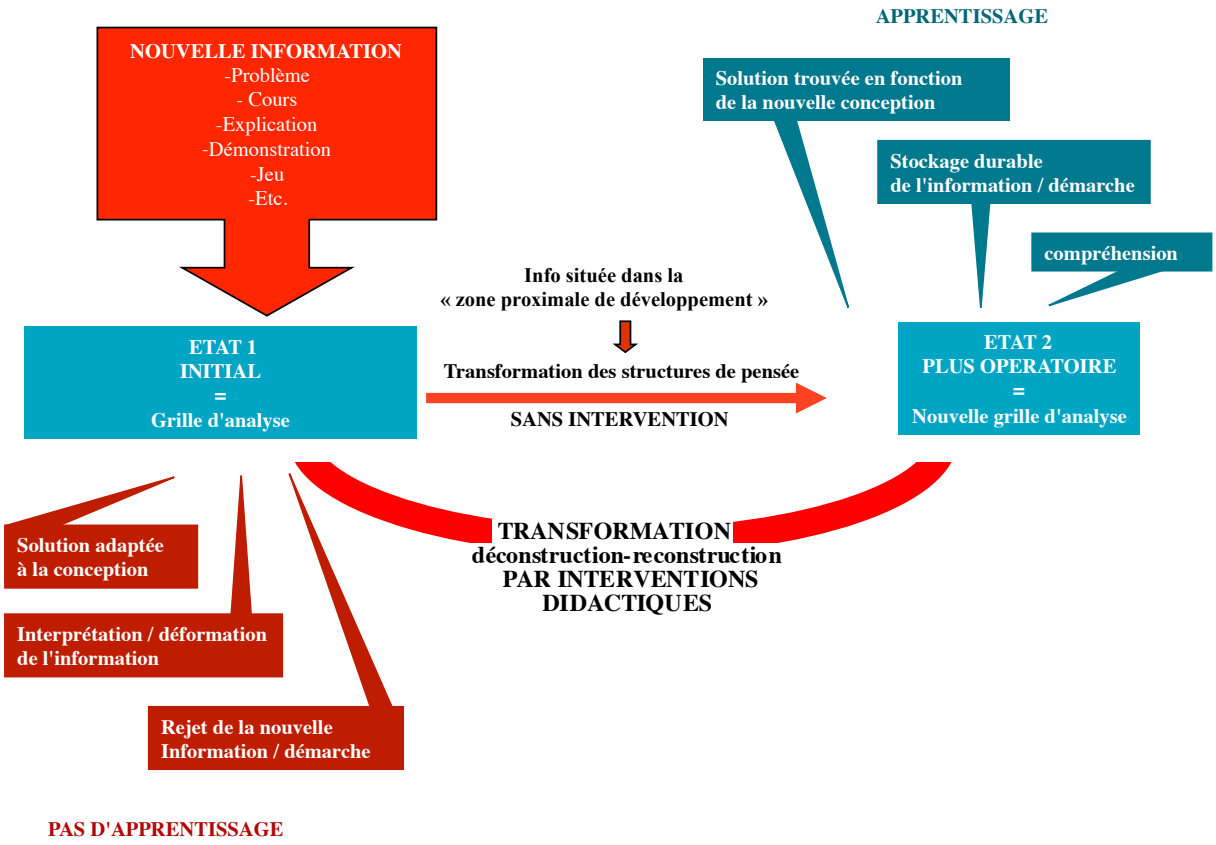


Figure 59 : Représentation plus générale du modèle allostérique, sous-entendant l'existence de plusieurs types de transformations possibles.

6.4.2. Des processus élémentaires « activés »

6.4.2.1. Eléments de cinétique chimique

Afin de comprendre les raisons pour lesquelles un système physico-chimique se transforme en un autre, le chimiste utilise les lois de la « thermodynamique chimique », fondée sur les concepts et lois forgés par les physiciens des machines thermiques, qui permet une compréhension fine de la stabilité de la matière. Nous verrons plus loin, à partir de considérations similaires, comment il est possible d'interpréter la robustesse des conceptions et de leurs assemblages à partir de la solidité et de la souplesse de leurs liens.

En revanche, pour paramétrer les transformations complexes de la matière, c'est à la « cinétique chimique » que le chimiste fait appel ; il parle alors de « mécanismes réactionnels », qu'il décompose en « actes élémentaires ». Chacun d'entre eux est traduit en des termes énergétiques, qui rendent compte de l'évolution de la stabilité des systèmes moléculaires en interaction au cours de leurs transformations élémentaires et donnent lieu à des représentations graphiques particulièrement évocatrices et explicites.

Comme la cinétique chimique, le modèle allostérique de 2002 s'attachait à décomposer tout processus complexe d'acquisition de nouveaux savoirs en actes d'apprendre élémentaires. Faisant porter nos efforts d'explicitation sur ces actes simples, nous allons tenter de les traduire eux aussi par des représentations graphiques qualitatives, destinées à rendre compte de l'évolution de la « stabilité » du

savoir au cours de ses transformations. Mais auparavant, il serait prudent de s'assurer que tous les types de transformation du savoir évoqués plus haut sont bien susceptibles d'être décrits de la même manière et regroupés dans une représentation commune, comme nous l'avons suggéré dans la sous-partie *6.1. Validité et légitimité de l'analogie*.

6.4.2.2. Première typologie des processus d'apprentissage

En reprenant l'ensemble des descriptions du savoir et des processus cognitifs réalisés dans la section *6.4.1. Apprendre…*, il est possible de lister les actes élémentaires correspondant à l'apprentissage. Des processus valables aussi bien pour les conceptions constituant les contenus du savoir que pour les métaconceptions de contrôle, ce qui dédouble l'ensemble des cas possibles :

1. Elaborer une conception (sites actifs et heuristique) structurant le savoir à partir d'informations cérébrales élémentaires (cas des apprentissages par imprégnation ou imitation notamment) ;
2. Ajouter des éléments à une conception préexistante (cas des apprentissages de type constructiviste, par assimilation-accommodation notamment) ;
3. Créer ou modifier un schème de pensée (structure I, II, II ou IV, site actif ou heuristique) préexistant (cas des apprentissages en mode K notamment) ;
4. Créer des liens entre deux conceptions disjointes ;
5. Rendre accessible une heuristique/conception peu ou mal utilisée ;
6. Elargir une heuristique particulière, assouplir une conception (cas des apprentissages adaptatifs effectués en mode R notamment) ;
7. Prendre conscience de ses « plis cognitifs » et confronter les conceptions qui les constituent ;
8. Bousculer ses paradigmes de pensée en commençant par en prendre conscience ;
9. Inhiber ou désinhiber une conception erronée dans certaines situations ;
10. Désinhiber une heuristique utile dans certaines situations…

6.4.2.3. La notion d'activation

Les 4 premiers processus nécessitent de créer de nouveaux liens entre des structures de pensée préexistantes, et parfois d'en casser pour permettre l'établissement de ces liens. On retrouve les caractéristiques des processus dits « activés », qui nécessitent le franchissement d'une barrière d'activation pour pouvoir se dérouler (et déjà décrits pour la chimie à la figure 38). Cette barrière peut toutefois être de hauteur nulle si aucun obstacle ne s'oppose à l'établissement des liens nouveaux (figures 60a et 60b), comme dans le cas du rapprochement spontané entre deux conceptions compatibles auquel on n'avait jamais fait attention.

Le 5e processus pourrait sembler d'une autre nature car il ne s'agit pas ici de modifier structurellement le savoir. Toutefois, l'effort de mémoire nécessaire pour retrouver une heuristique et la rendre accessible nécessite un investissement initial qu'il ne sera plus nécessaire de faire ensuite : pour apprendre en rendant l'heuristique mobilisable, il a fallu franchir une barrière d'activation. En outre, rendre accessible une heuristique revient souvent à construire une métaconception qui oriente l'information vers ladite heuristique, ce qui revient à un apprentissage du premier type.

Le 6e processus ne semble pas pouvoir être décrit en terme d'activation ; nous verrons en effet plus loin comment en rendre compte ; mais le traitement que nous avons fait plus haut des questions liées à la souplesse du savoir laisse penser qu'il sera là encore de nature entropique, et donc visualisable dans la dimension transverse.

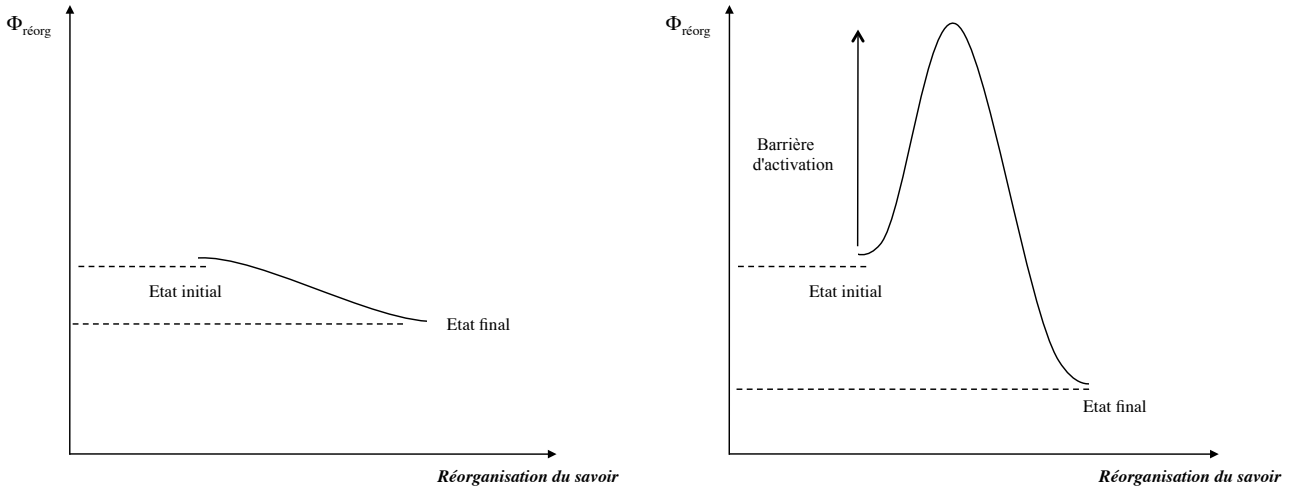


Figure 60 : Courbes d'apprentissage représentant des processus a/ non activé et b/ activé.

Les 7e et 8e processus nécessitent eux aussi un effort initial, ne serait-ce que pour prendre conscience des contradictions qui existent entre ses plis cognitifs ou pour se figurer ce que pourrait être un autre paradigme de pensée. Toutefois, en tant qu'étapes préalables permettant la remise en cause de certains éléments du savoir, ils ne constituent pas des processus d'apprentissage à proprement parler et une fois réalisées, ces étapes débouchent sur l'un des 8 autres cas.

Enfin, les derniers processus, de type inhibiteur-désinhibiteur, nécessitent soit la fermeture ou l'ouverture de certaines heuristiques, soit la construction de métaconceptions de contrôle et, dans tous les cas, commencent par une réorganisation des conceptions. Ils sont donc eux aussi activés.

Pour l'ensemble de ces processus, il est difficile de prédire la hauteur de la barrière d'activation : l'inhibition de la réponse « du lait » dans l'exemple de la vache sera par exemple plus aisée que celle du test de logique conditionnelle de Houdé. Mais d'une manière générale, on peut prévoir trois effets majeurs sur la hauteur de la barrière d'activation, qui sera d'autant plus élevée que :

1. La déconstruction portera sur des conceptions très ancrées et stabilisées[66] ;
2. La réorganisation du savoir sera importante ;
3. La transformation conduira à des conceptions peu crédibles et peu stabilisées.

Apprendre peut donc être décrit comme un cheminement individuel réductible à une succession d'actes élémentaires activés consistant chacun, quelle qu'en soit la nature, en le franchissement d'une barrière d'activation entre deux états de savoir, et au passage par un « état de transition » dont la nature et la structure pourront être décrites de la même manière que les autres états de savoir. La confirmation de cette propriété va permettre non seulement de représenter les processus d'apprentissage et de comprendre comment franchir la barrière d'activation correspondant à chacun de ces cas, mais également de déterminer d'autres types de processus d'apprentissage qui découleront directement des développements théoriques subséquents de l'analogie allostérique.

6.4.3. Fonctions d'optimisation et d'apprentissage

Dans la sous-partie *6.3. Représentation des processus cognitifs*, travaillant dans l'hypothèse de processus cognitifs ne faisant intervenir la transformation du savoir que dans de rares cas, et toujours de manière légère, nous nous sommes essentiellement intéressés à la fonction $\Phi_{affin}(\tilde{\imath})$, caractéristique

[66] Ces effets seront caractérisés et décrits dans la sous-partie *6.5. Stabilisation du savoir*.

de l'interaction entre une information et un espace de conceptions donné. Pourtant, c'est la fonction $\Psi_{cog}(\tilde{\imath}) = \Phi_{affin}(\tilde{\imath}) + \Phi_{réorg}$ qui régit les processus cognitifs, et non pas seulement la fonction $\Phi_{affin}(\tilde{\imath})$: en cas d'apprentissage, selon la nature perturbatrice ou non de ĩ, la minimisation de $\Psi_{cog}(\tilde{\imath})$ peut passer par l'optimisation de $\Phi_{réorg}$, c'est-à-dire par la réorganisation du savoir et de ses règles d'utilisation.

6.4.3.1. Caractéristiques et représentation de la fonction $\Phi_{réorg}$

La fonction $\Phi_{réorg}(\alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_p)$ caractérise, rappelons-le, le coût énergétique de la réorganisation de l'espace des conceptions, et donc la stabilité des conceptions elles-mêmes, quelle que soit l'information qui leur est présentée, cette stabilité se répercutant ensuite sur $\Psi_{cog}(\tilde{\imath})$. Sa représentation dans l'espace multidimensionnel des α_i ne doit pas être confondue avec celle de $\Phi_{affin}(\tilde{\imath})$ dans l'espace des x_i : les x_i sont les degrés de liberté d'une information se déplaçant dans un espace de conceptions donnés, alors que les α_i sont ceux de l'évolution de la structure du savoir. Cette fonction $\Phi_{réorg}(\alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_p)$ est donc plus abstraite que la fonction $\Phi_{affin}(\tilde{\imath})$ car le déplacement d'un point sur sa représentation graphique ne représente plus le déplacement spatial d'une entité réelle (l'information) mais les déformations d'un ensemble d'entités (les conceptions). L'espace des $(\alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_p)$ est ce que les physiciens nomment un « espace des phases ».

Comme chaque point $(\alpha_1^0, \alpha_2^0, \ldots, \alpha_p^0)$ de la fonction $\Phi_{réorg}$ correspond à un état du savoir, il est possible d'y faire circuler une information et de construire l'ensemble de la fonction $\Phi_{affin}(\tilde{\imath}, x_1, x_2, \ldots, x_n, \alpha_1^0, \alpha_2^0, \ldots, \alpha_p^0)$. Si les α_i sont les p degrés de liberté de l'organisation du savoir (incluant les conceptions, les heuristiques et les métaconceptions), alors il est possible de représenter $\Phi_{réorg}(\alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_p)$ dans un espace de dimension p+1 (p dimensions correspondant aux p degrés de liberté, plus 1 dimension pour $\Phi_{réorg}$). Or en un point donné $(\alpha_1^0, \alpha_2^0, \ldots, \alpha_p^0)$, $\Phi_{réorg}(\alpha_1^0, \alpha_2^0, \ldots, \alpha_p^0)$ ne peut prendre qu'une seule valeur : celle de l'énergie de l'espace des conceptions. Cette fonction constitue donc, elle-aussi, une hypersurface de dimension p, et toute transformation du système qu'elle décrit peut être représentée par le déplacement d'un point représentatif de ce dernier sur l'hypersurface. Dès lors, lors d'une transformation entre deux états de savoir, et comme nous l'avons fait avec la fonction Φ_{affin}, il est possible d'effectuer une coupe verticale de cette hypersurface le long du trajet de ce point, puis de la déplier et de la projeter sur une surface à deux dimensions : l'énergie en ordonnées et la « coordonnée d'apprentissage » en abscisses, comme dans le paragraphe *6.3.3.1. Fonction d'affinité $\Phi_{affin}(\tilde{\imath})$*.

Pour être plus abstraite que Φ_{affin} (qui était très analogue au déplacement d'une bille sur une surface bosselée), $\Phi_{réorg}$ n'en correspond pas moins à une autre fonction connue : celle qui décrit l'énergie d'un système moléculaire en transformation. En plus de constituer une confortation de l'analogie allostérique, c'est une opportunité que nous saisissons pour détourner les représentations graphiques des chimistes à des fins de représentation de la transformation des conceptions.

Les figures 61a et 61b montrent justement comment, à partir du trajet d'un point représentatif d'un système donné sur une hypersurface, il est possible d'obtenir une représentation en deux dimensions. Le système considéré est ici le plus simple qui soit et consiste en une molécule de dihydrogène H_2 et un atome H en interaction linéaire :

$$H_a\text{-}H_b + H_c \Leftrightarrow H_a + H_b\text{-}H_c$$

L'angle H_a- -H_b- -H_c étant contraint, il ne reste que deux degrés de liberté, d_{HaHb} et d_{HbHc}, ce qui permet de représenter l'ensemble dans un « s » de dimension 3, c'est-à-dire un espace euclidien dont on a l'habitude. On retrouve le type de courbes utilisées dans la sous-partie *6.3. Représentation des processus cognitifs* pour décrire Φ_{affin}.

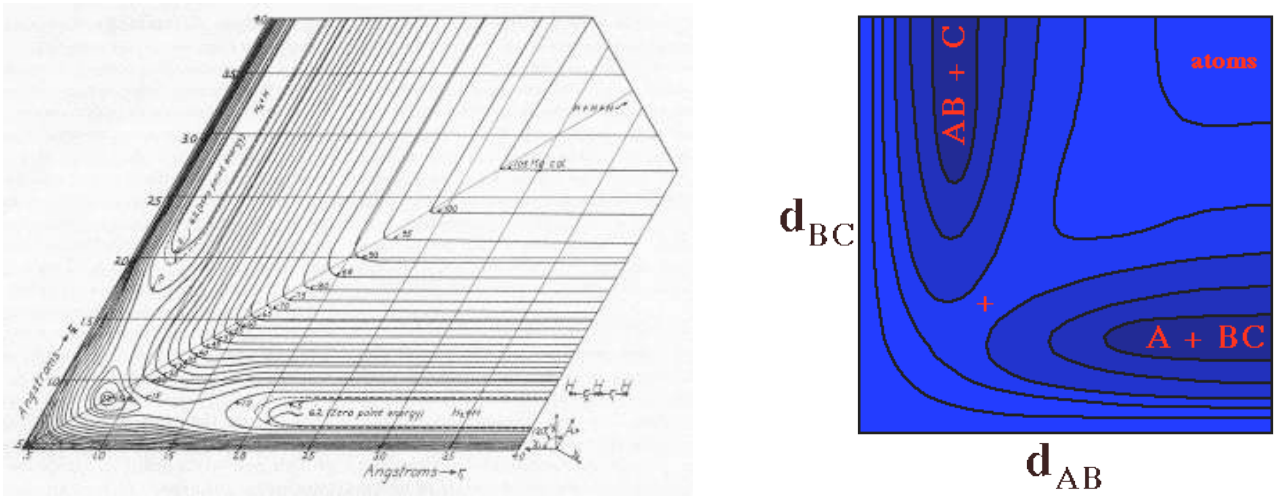


Figure 61 : Représentations tridimensionnelle de la surface d'énergie et des lignes de niveau correspondant au système H_a-H_b + H_c ⇔ H_a + H_b-H_c.

On notera que dans le coin supérieur droit, les atomes sont éloignés à l'infini (et donc libres). Dans le coin inférieur gauche, les atomes sont superposés. Ces deux situations sont énergétiquement instables (et la seconde encore plus que la première) : entre les deux, le long de la diagonale, il existe un point d'énergie minimale, représenté par la croix rouge. La figure 62 montre cet effet à un autre endroit de la surface d'énergie.

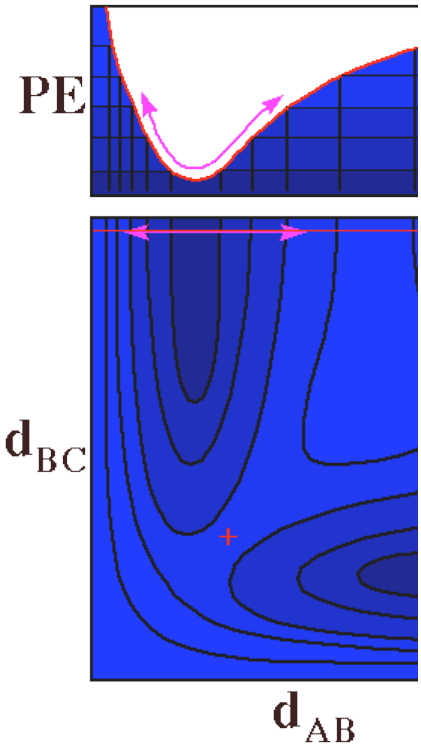


Figure 62 : a/ Coupe transversale illustrant la largeur de b/ la vallée empruntée par le système.

Cette croix rouge représente également le maximum d'énergie de la trajectoire la plus basse du système. Avec les notations de la figure 63, elle correspond à l'état A - - B - - C ; on le nomme *état de transition*. La surface d'énergie possède, à cet endroit précis, la forme d'une selle de cheval : elle est convexe dans la dimensions transverse, et concave dans la direction de la cordonnée de réaction.

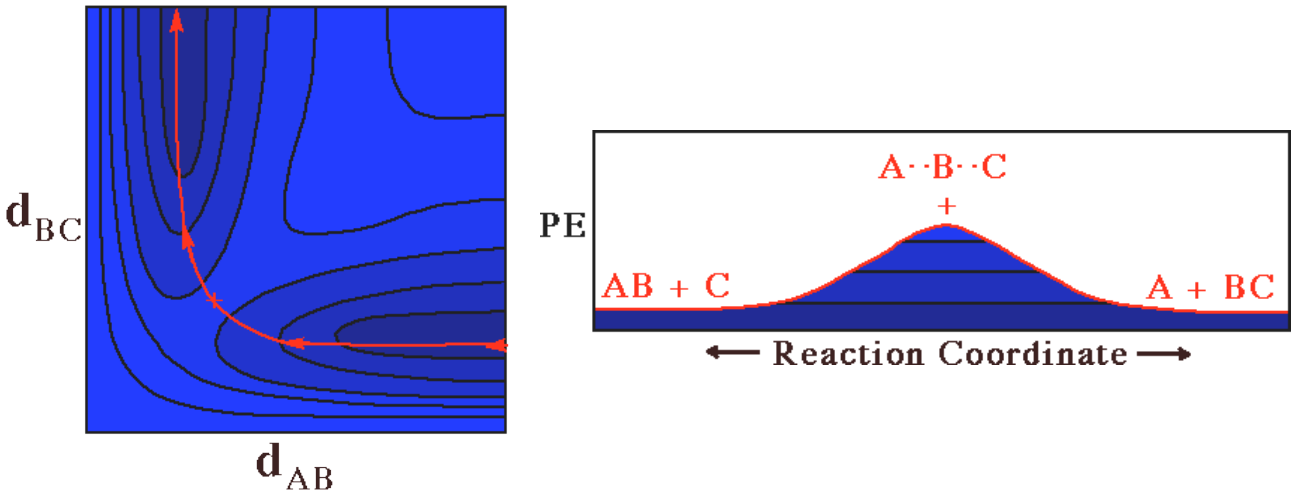


Figure 63 : a/ Coupe verticale dans la surface d'énergie et b/ déploiement en deux dimensions de la coordonnée de réaction (dans notre cas, *coordonnée d'apprentissage*).

6.4.3.2. Stabilité des schèmes de pensée et fonction θ d'apprentissage

La signification de $\Phi_{réorg}(\alpha_1, \alpha_2, ..., \alpha_p)$ a été précisée : elle décrit la « stabilité du savoir », c'est-à-dire de l'ensemble des conceptions. En ce sens, elle est peu opératoire car les processus d'apprentissage, tels que nous allons les aborder, concernent en général une ou quelques conceptions et non l'ensemble d'entre elles (à cela, une raison pratique sur laquelle nous reviendrons : la barrière d'activation est d'autant plus grande que le nombre de réorganisations élémentaires est grand).

Quel est le lien entre $\Phi_{réorg}$ et les stabilités des *N* conceptions individuelles ? Si l'on nomme $(\alpha_{i1}, \alpha_{i2}, ..., \alpha_{in(i)})$ les n(i) degrés de liberté liés aux modifications de la conception i (où $\Sigma_{(1\leq i\leq N)}\, n(i) = p$), et si l'on construit pour chaque conception sa fonction énergie potentielle $\varphi_i(\alpha_{i1}, \alpha_{i2}, ..., \alpha_{in(i)})$, alors :

$$\Phi_{réorg}(\alpha_{11}, ..., \alpha_{ij}, ..., \alpha_{Nn(N)}) = \Sigma_{(1\leq i\leq N)}\, \varphi_i(\alpha_{i1}, \alpha_{i2}, ..., \alpha_{in(i)}) + \Sigma_{(1\leq i\leq N \text{ et } 1\leq k\leq N \text{ et } i<k)}\, \xi_{ik}$$

où ξ_{ik} est l'énergie potentielle d'interaction entre les conceptions i et k.

Lors de la description des processus d'apprentissage, pour simplifier et intégrer ce second terme dans le premier, nous considérerons non pas les N conceptions individuelles isolées mais les groupes de conceptions interdépendantes modifiées lors d'un processus donné. En d'autres termes, pour chacun de ces schèmes de pensée constitués de π conceptions, nous définirons $\theta_{schème}(\alpha_{11}, ..., \alpha_{ij}, ..., \alpha_{\pi n(\pi)})$ telle que :

$$\theta_{schème}(\alpha_{11}, ..., \alpha_{ij}, ..., \alpha_{\pi n(\pi)}) = \Sigma_{(1\leq i\leq \pi)}\, \varphi_i(\alpha_{i1}, \alpha_{i2}, ..., \alpha_{in(i)}) + \Sigma_{(1\leq i\leq \pi) \text{ et } 1\leq k\leq \pi \text{ et } i<k)}\, \xi_{ik}$$

Dans toute la suite et pour s'affranchir de ces indices (dont nous conserverons toutefois à l'esprit la signification), nous nommerons $\theta_{schème}(\alpha_1, \alpha_2, ..., \alpha_n)$ la fonction énergie potentielle d'un schème de pensée donné (avec $\Sigma_{(1\leq i\leq \pi)}\, n(i) = n$), où les $(\alpha_1, \alpha_2, ..., \alpha_n)$ seront ses n degrés de liberté. La représentation de $\theta_{schème}(\alpha_1, \alpha_2, ..., \alpha_n)$ dans l'espace de dimension n+1 permettra ainsi de visualiser chaque processus d'apprentissage individuellement. Lorsque ce dernier ne concernera qu'un seul site actif, qu'une seule heuristique ou qu'une seule conception, on utilisera respectivement les notations $\theta_{site}(\alpha_1, \alpha_2, ..., \alpha_n)$, $\theta_{heur}(\alpha_1, \alpha_2, ..., \alpha_n)$, $\theta_{conc}(\alpha_1, \alpha_2, ..., \alpha_n)$. Dans cette perspective, une nouvelle manière d'écrire la fonction $\Phi_{réorg}(\alpha_1, \alpha_2, ..., \alpha_p)$ initiale, qui d'écrivait l'énergie totale de réorganisation du savoir, est $\theta_{sav}(\alpha_1, \alpha_2, ..., \alpha_p)$. Dans la mesure où les variations de θ correspondront toujours à une transformation d'une partie du savoir, on la désignera désormais par le nom de *fonction d'apprentissage*.

Lorsque nous considérerons cette fonction d'apprentissage, nous garderons bien sûr à l'esprit qu'un apprentissage ne se produisant jamais seul, *ab initio*, c'est toujours la fonction générale de traitement cognitif $\Psi_{cog}(\bar{\imath})$ qui détermine l'évolution de la pensée. Mais nous avons montré plus haut qu'il était possible de s'affranchir du rôle conjoncturel de l'information dans deux cas distincts : 1/ lorsque l'information est présentée d'une manière irrévocable qui empêche sa déformation (elle prend alors un simple rôle de perturbation de $\Phi_{réorg}$ et 2/ sur la durée, lorsqu'un faisceau d'informations converge pour « forcer » $\Phi_{réorg}$ à évoluer en finissant par rendre les schèmes concernés manifestement non opératoires. Sauf mention contraire, c'est dans le cadre de ces deux cas que nous considérerons les études ultérieures de θ.

6.4.4. Correspondances…

L'intérêt de ces représentations et de la fonction θ pour les processus d'apprentissage apparaît évident. En effet, nous avons vu dans la section *6.4.2. Des processus élémentaires « activés »* que tout processus d'apprentissage pouvait être considéré comme le passage d'un état de savoir à un autre, à travers le franchissement d'une barrière d'activation plus ou moins haute. Par ailleurs, rappelons que nous avons assimilé la structure du savoir à un ensemble de protéines, liées entre elles par des interactions similaires aux forces qui régissent les structures moléculaires. Dès lors, toute transformation du savoir, dans le cadre de cette analogie, peut faire l'objet d'une tentative de transposition des caractéristiques des transformations de la matière qui apparaissent sur ces représentations graphiques.

Dans la suite, pour se conformer à l'usage du modèle allostérique et parce que nous aurons besoin d'un terme générique plus commode que celui de « structures de pensée », nous continuerons à utiliser la plupart du temps le terme de « conception » pour décrire de manière générale l'ensemble des structures et métastructures de pensée (sites actifs, heuristiques, conceptions, métaconceptions, schèmes de pensée) que nous avons définies comme constitutives de l'organisation du savoir.

6.4.4.1. Enthalpie et entropie d'apprentissage

En particulier, la forme et la profondeur d'une vallée représentatitves d'un savoir donné sont directement liées à la stabilité de l'édifice. Nous reviendrons sur les paramètres réels régissant cette stabilité, mais il est d'ores et déjà possible de prévoir qu'elle puisse être considérée comme la somme d'une composante *enthalpique* et d'une composante *entropique* :

- La composante *enthalpique* caractérise la solidité des liens ; elle dépend de la force des liaisons et sa dimension est celle d'une énergie (on confondra d'ailleurs les deux notions dans la suite, par souci de simplification mais en utilisant souvent le terme enthalpie qui est celui qu'emploient les chimistes). La variation de l'enthalpie lors de la transformation est par suite directement liée à la nature et au nombre de liens qu'il est nécessaire de casser et de recréer lors du processus ; en d'autres termes, au degré de réorganisation du système. En ce sens, l'enthalpie de transformation est directement visualisable comme la valeur absolue de la fonction d'apprentissage lors du déplacement d'un point sur l'hypersurface $\Phi_{réorg}$ (ou plutôt, désormais, $\theta_{schème}$). C'est elle qui définit la hauteur de la barrière d'activation, vue comme la différence entre l'enthalpie de l'état de transition et celle de l'état initial.
- La composante *entropique* caractérise quant à elle la souplesse de l'édifice ; elle dépend certes de la nature des liens, mais surtout de la géométrie de la structure. La variation de l'entropie lors de la transformation dépend bien entendu elle aussi de la réorganisation du savoir, mais elle est visualisable dans la dimension transverse du chemin parcouru par le point représentatif du système en évolution. Comme dans le cas de la fonction Φ_{affin}, elle correspond en tout point à la courbure transverse de la vallée d'énergie (d'enthalpie) de $\theta_{schème}$: plus le système est rigide et contraint, plus la courbure est grande et la vallée resserrée.

Ce nouveau paramètre fournit un élément particulièrement intéressant pour la transformation du savoir : si celle-ci est rendue plus difficile lorsque la barrière d'activation croît, elle est facilitée par toute transformation qui soulage la rigidité du système. En d'autres termes, si l'entropie d'activation, définie comme la différence entre les courbures transversales de l'hypersurface d'énergie à l'état de transition et à l'état initial (figure 64), est négative, alors la transformation est facilitée, comme si l'apprentissage permettait alors de relâcher des « tensions cognitives ».

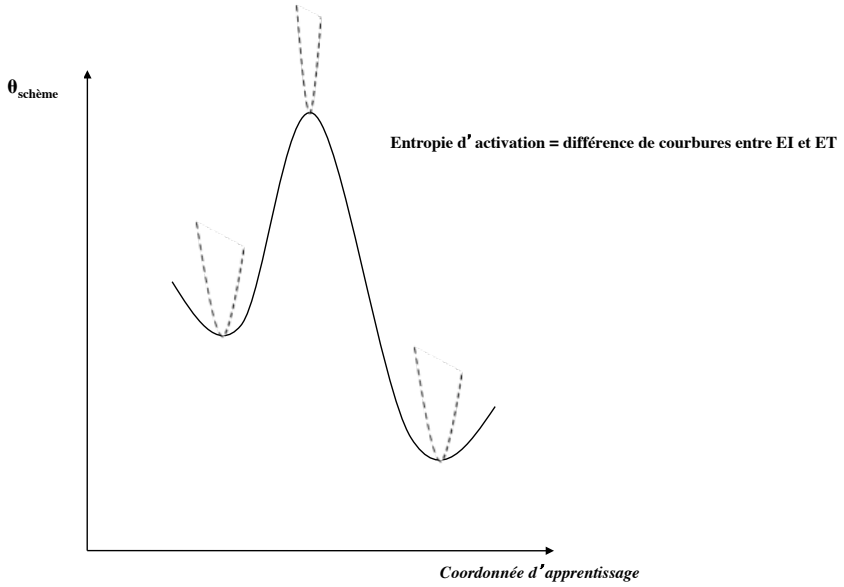


Figure 64 : Lien entre l'entropie d'activation et les courbures de l'hypersurface à différents moments de la transformation du savoir.

Un phénomène qu'il est facile de représenter graphiquement, comme on l'a fait sur la figure 65 : en imaginant une bille lancée sur la surface dans la direction du « col », on conçoit aisément qu'il y ait bien plus de risques que la bille fasse demi-tour si la vallée se resserre en montant que si au contraire elle s'élargit. Nous indiquerons plus loin la signification de cette notion de « souplesse du savoir ».

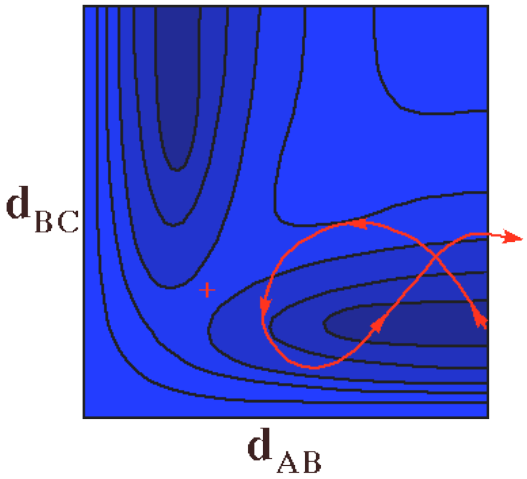


Figure 65 : Trajectoire conduisant à un non apprentissage, en dépit d'une impulsion initiale suffisante, l'approche des réactifs ayant eu lieu de manière inappropriée. Avec une vallée plus large, la trajectoire aurait pu être passante.

6.4.4.2. Franchissement de la barrière d'activation

Une autre correspondance à définir est celle de la température, seule considérée comme capable de permettre aux réactifs de franchir la barrière d'activation dans les modélisations les plus simples des transformations de la matière. Dans la théorie cinétique des gaz, où les réactions sont considérées comme s'effectuant lorsque les réactifs se rencontrent avec suffisamment d'énergie, la vitesse de réaction est en effet décrite comme proportionnelle à l'exponentielle $e^{-Ea/RT}$, où E_a est l'énergie d'activation et R la constante des gaz parfaits. Mais si la température apparaît dans cette relation, c'est davantage en raison de ce qu'elle permet lorsqu'elle augmente, à savoir l'exploration de davantage de configurations et la réalisation de davantage de rencontres entre molécules.

En l'occurrence, comme nous l'avons déjà évoqué pour les cas de traitement de l'information nécessitant également le franchissement d'une barrière d'activation (paragraphe *6.3.4.6. Contrôle cinétique et contrôle thermodynamique*), la seule grandeur assimilable à la température semble être l'agitation donnée à ses conceptions pour leur permettre de se transformer. Pour la stimuler, plusieurs paramètres sont susceptibles d'intervenir : en premier lieu la volonté d'apprendre, qu'on appellera également motivation ; en second lieu, les sollicitations qui seront faites par l'environnement de l'apprenant pour qu'il mobilise son savoir, l'explore et le pousse dans ses retranchements ; en troisième lieu, la confiance (en soi, en la situation pédagogique, en le formateur, en le regard des autres…), car déstabiliser son savoir inquiète et est psychologiquement coûteux.

Motivation, prédisposition à l'effort et confiance sont donc les paramètres qui se dissimulent derrière l'équivalent de la température qui permet de franchir la barrière d'activation de l'apprentissage. Pour les rassembler en un seul, nous utiliserons un terme équestre caractérisant l'état d'esprit du cheval consistant en un désir mental et physique de se porter en avant, de se mettre naturellement en mouvement avec énergie, constance et plaisir : l'*impulsion*. La vitesse du cheval n'est pas un critère d'impulsion, qui se manifeste beaucoup plus dans la manière dont il se livre et travaille dans toutes les allures. Elle se traduit par le désir de répondre avec promptitude à toutes les sollicitations du cavalier et à continuer le mouvement avec entrain. En remplaçant le cheval par l'apprenant et le cavalier par l'enseignant, on conçoit que l'idée d'impulsion puisse être étendue à la capacité à franchir une barrière d'activation lors d'un apprentissage. Remarque amusante : les cavaliers de saut d'obstacle savent bien que la principale préoccupation qu'ils doivent avoir pour franchir les… barrières disposées sur le parcours est justement de préserver l'*impulsion* de leur monture.

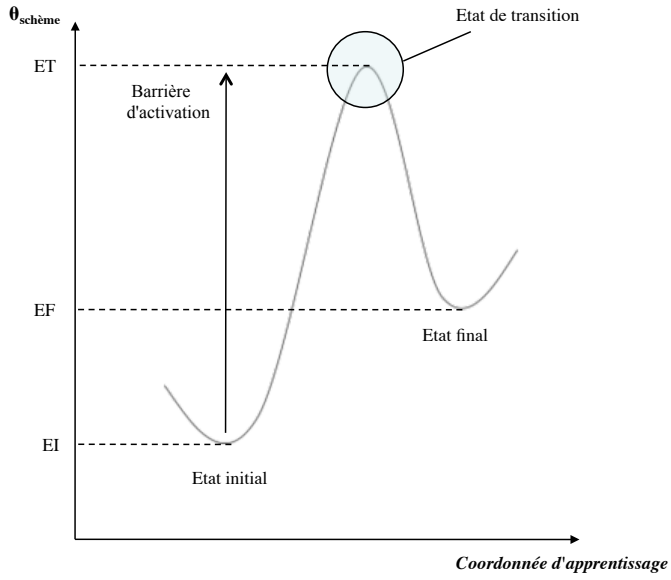


Figure 66 : Apprentissage conduisant à un état final de moindre stabilité que l'état initial.

Ces grandeurs ne sont pas quantifiables et nous ne nous risquerons pas à les faire figurer dans une fonction exponentielle. Mais on conçoit assez bien qu'en l'absence de l'un de ces ingrédients seulement, l'apprenant risque de rester du côté de la barrière ne correspondant pas à ce que son enseignant attend de lui.

A ce stade, mentionnons encore que si la motivation, les ressources cognitives et la confiance de l'apprenant sont suffisantes pour franchir la barrière dans un sens, et qu'il arrive dans un état de savoir d'énergie plus élevée (figure 66), il pourra d'autant mieux repasser la barrière dans l'autre sens et revenir à son état initial. D'où l'importance pour l'enseignant et l'apprenant de travailler à la stabilisation des nouvelles conceptions, ce qui fera l'objet de la sous-partie *6.5. Stabilisation du savoir*.

6.4.4.3. Enthalpie libre et enthalpie libre d'activation

Est-il possible de combiner les trois paramètres que sont l'enthalpie d'activation (H_a), l'entropie d'activation (S_a) et la température (T) lorsqu'il s'agit de décrire les processus d'apprentissage ? Les chimistes le font en définissant une fonction dite « enthalpie libre » (G) qui en dépend de la manière suivante :

$$G = H - T.S$$

ou, lors d'un processus activé, si $X_a = X_{\text{Etat de transition}} - X_{\text{Etat initial}}$ quelle que soit la grandeur X_a :

$$G_a = H_a - T.S_a$$

Combinant la nécessité d'agir à la fois sur la solidité et la souplesse des édifices, qui sont d'autant plus stables que la grandeur G est faible, ils montrent que la fonction G_a doit également être minimisée dans les transformations de la matière.

Cette grandeur a-t-elle un sens pour décrire les processus d'apprentissage ? Comme nous l'avons vu, la barrière d'activation est d'autant plus facile à franchir que la réorganisation ne nécessite pas trop de réarrangements (minimisation de H_a), que la motivation, la prédisposition à l'effort et la confiance en la situation pédagogique sont plus grandes (maximisation de T) et que la vallée d'enthalpie ne se resserre pas trop (minimisation de S_a). Or ce que dit cette relation, c'est que si l'entropie d'activation est négative (c'est-à-dire si la vallée se resserre, ce qui est nécessairement le cas la plupart du temps), plus la température sera élevée, plus la barrière d'enthalpie libre sera difficile à passer ; autrement dit, que si tous les paramètres sont réunis pour faciliter « l'agitation des conceptions » de l'apprenant, la capacité d'apprentissage sera réduite par une plus grande rigidification de l'état de transition.

Il peut sembler surprenant que ces paramètres, qui favorisent bien évidemment le franchissement de la barrière d'activation d'un point de vue enthalpique, le défavorisent simultanément dans certains cas. Deux interprétations peuvent être données de ce résultat :

- Les effets entropiques sont probablement toujours relativement faibles par rapport aux effets enthalpiques, la souplesse du savoir jouant un moindre rôle que la rupture de ses liens ; il est donc possible que cet effet soit systématiquement du second ordre.
- Lorsque l'état de transition nécessite une configuration particulière, ce qui peut s'interpréter par la nécessité d'adopter un raisonnement précis et d'envisager un problème d'une manière bien définie pour parvenir à le surmonter, il est probablement inutile d'être trop prompt à saisir toute nouvelle information, à avancer de manière désordonnée ; en d'autres termes, il est nécessaire de se concentrer sur un point bien précis.

Mais dans tous les cas, ces considérations incitent à réduire la rigidité de l'état de transition. Que signifie un état de transition souple ? Comme nous verrons plus loin avec la stabilité des schèmes de pensée, il correspond à une configuration temporaire des structures de pensée en transformation qui reste lâche, dont les interactions peuvent se faire et se défaire dans un ordre peu déterminant, qui laisse explorer diverses configurations avant de s'engager dans la vallée adéquate. Notons d'ailleurs que si plusieurs vallées, menant vers des conceptions différentes, s'ouvrent à l'issue de l'état de transition, il est préférable qu'il soit souple pour permettre à l'apprenant de choisir la bonne plutôt que d'être canalisé dans la plus contrainte, qui n'est pas nécessairement la plus opportune.

6.4.4.4. Zone proximale de développement

Ces considérations permettent à présent de donner une signification à ce concept généralement un peu flou proposé par Vygotsky et souvent évoqué en sciences de l'éducation : nous proposons en effet de caractériser la « zone proximale de développement » comme l'ensemble des vallées d'énergie potentielle situées juste derrière les barrières d'activation franchissables correspondant aux apprentissages possibles et immédiats d'un individu. En devenant visualisable dans l'« espace » des phases de la fonction d'apprentissage, la notion de « zone » devient alors particulièrement pertinente.

6.5. Stabilisation du savoir

6.5.1. Fiabilité et caractère opératoire des conceptions

La stabilité des schèmes de pensée, des conceptions, des heuristiques ou des sites actifs, définie plus haut à travers $\Phi_{réorg}$ puis $\theta_{schème}$, peut être définie comme leur robustesse, c'est-à-dire leur capacité à persister[67]. Or deux conditions président à cette persistance :

1. Elles (ils) ne doivent pas pouvoir facilement être transformé€s pour conduire à des structures de pensée plus stables ;
2. Elles (ils) doivent pouvoir être utilisé€s pour produire du sens, c'est-à-dire produire des associations stables avec des informations provenant de l'environnement.

Autrement dit, une structure de pensée stable est d'abord *fiable* (on croit en la possibilité qu'elle soit bonne) et *opératoire* (c'est-à-dire capable de fournir des interprétations du monde satisfaisantes). En ce sens, la stabilité d'une conception peut être définie comme la *confiance* qu'on lui porte. Non pas la confiance en soi, qui agirait plutôt sur la motivation à franchir la barrière d'activation, mais bien en son propre savoir.

L'influence du caractère opératoire d'une conception peut être rapproché de l'idée de *plausibilité* (c'est-à-dire la possession d'un pouvoir explicatif supérieur) défendue par la *théorie du changement conceptuel*. Cette dernière y ajoute un critère de *fécondité*, à savoir la capacité à offrir un potentiel pour de nouvelles compréhensions ou découvertes ; une notion qui, dans notre modèle, réunit le caractère *opératoire* à l'idée d'*intelligibilité* (voir ci-dessous) au sens où elle représente à la fois la cohérence de la nouvelle conception avec le reste du savoir et avec les informations fournies par l'environnement.

6.5.2. Stabilité et justesse

Précisons ici qu'une conception ou une heuristique stables ne sont pas nécessairement justes dans les mêmes proportions. Bien au contraire, la conception la plus stable est bien souvent celle que l'enseignant a choisi de transformer en une autre qui, au moins temporairement, n'est pas aussi séduisante. L'effet est bien connu en matière d'idées reçues et de croyances populaires : les idées les plus simples sont souvent tenaces parce qu'elles sont très opératoires à courte vue (figure 67). Les

[67] Notons qu'à l'inverse, pour ce qui concerne un état de transition, la stabilité représente la capacité à être franchi facilement.

partis politiques populistes ne se privent pas de ce ressort : que ce soit en matière d'immigration ou d'économie, les idées simplistes sont les plus difficiles à combattre car elles nécessitent de déployer des trésors de complexité pour être appréhendées convenablement.

Figure 67 : Exemple d'affiches de l'UDC, le parti d'extrême droite Suisse,
flattant les peurs populaires à travers des idées simplistes mais plus difficile à contrer qu'il ne l'est de les émettre.

Sous une forme nettement plus drôle et tout aussi caricaturale, Quino a de son côté imaginé la suite de l'histoire commencée dans la figure 43 présentée plus haut. N'oublions pas qu'après lui avoir montré leur position sur la mappemonde (information ĩ), le père de Mafalda avait explicitement validé sa conception erronée du champ de gravité terrestre en approuvant l'information (ř) que cette dernière lui avait fait produire, selon laquelle elle avait la tête en bas (figure 68).

Figure 68 : Fonctionnement parfaitement logique produit à partir d'une conception fausse.

Cette idée ne tient pas du point de vue du plus élémentaire respect de la perception que Mafalda peut avoir du monde ; pourtant, puisqu'elle semble (au moins temporairement) opératoire pour interpréter ce qu'elle observe sur la mappemonde et confirmée par son père en qui elle a confiance, elle préfère produire une nouvelle conception sous la forme d'une théorie très personnelle lui permettant de donner du sens au monde, plutôt que de la remettre en question.

Cette conception est-elle stable pour autant ? Peu importe, en l'occurrence, si la conception est juste ou pas ; ce qui compte, c'est la confiance que Mafalda lui porte. Une confiance bien sûr évolutive : il est

peu probable que son papa lui laisse croire ce qu'elle dit et, s'il ne parvient pas à lui faire changer d'avis, elle se rendra vite compte du caractère non-opératoire de sa nouvelle conception, momentanément stabilisée par une information fausse. Cette conception passera alors de A à A' dans la figure 69a.

Pour illustrer l'influence du caractère opératoire sur la stabilité d'une conception, on peut alors considérer que l'information convenablement traitée par elle s'y intégrant temporairement, une partie de la stabilisation de Φ_{affin} se répercute sur Φ_{reorg}. Mais une fois l'information (représentée comme la petite protéine jaune dans la figure 69b) oubliée, la conception retrouve sa stabilité initiale. Finalement, à long terme, le caractère opératoire devra concerner un grand nombre d'informations pour pouvoir se répercuter sur Φ_{reorg} et conduire à la création de conceptions de contrôle et/ou à l'élargissement d'heuristiques, voire à la création de liens avec d'autres conceptions, venant étayer et renforcer le nouveau schème.

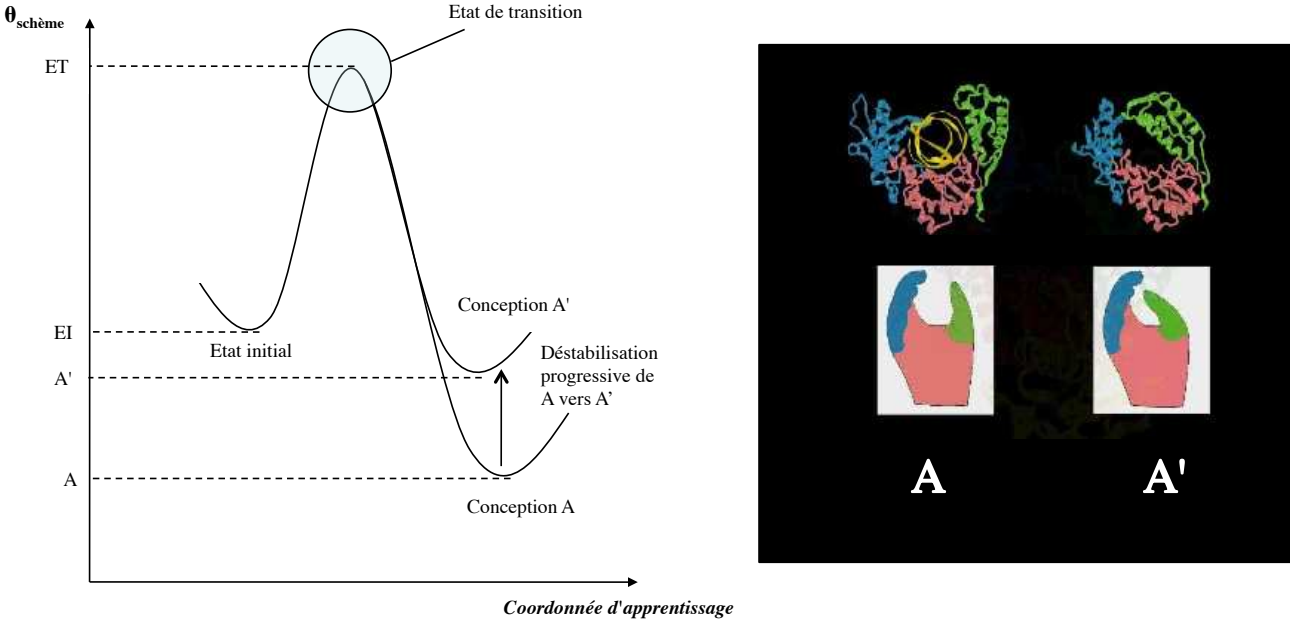


Figure 69 : Représentation graphique et schématique de la déstabilisation d'une conception lors de l'oubli progressif d'une information la rendant temporairement opératoire.

Dernier exemple : pour analyser l'origine de la forme du croissant de Lune, de nombreuses personnes emploient une conception extrêmement stable, car opératoire et correspondant à un phénomène connu et admis : l'éclipse. Et si personne dans l'assistance, lorsque cette expérience est réalisée, ne proteste quant à la légitimité de l'interprétation liant la forme de la Lune à l'ombre projetée de la Terre sur son satellite naturel, il est probable que plusieurs indécis se laissent convaincre. C'est ce qui nous conduit à un autre paramètre important régissant la stabilité d'une conception.

6.5.3. Stabilité, ascendant et consensualité

Dans le roman *Les Falsificateurs*, Antoine Bello écrit (2007) : « *Ce qui détermine que l'on croit ou non à une histoire [...] dépend de qui raconte l'histoire* ». De fait, il est plus aisé de croire ses parents que ses amis lorsqu'on est enfant, et le contraire lorsqu'on est adolescent. Plus facile de croire son enseignant si on lui porte de l'estime et plus facile de croire le curé si l'on est catholique pratiquant. La stabilité d'une conception dépend ainsi de la confiance que l'on accorde aux personnes qui nous l'inculquent ; en particulier, on croit plus facilement nos pairs et les personnes qui ont un ascendant (accepté) sur

nous. Cela peut probablement expliquer l'adhésion de peuples entiers aux idées de certains dictateurs particulièrement charismatiques.

Une thèse renforcée par la théorie du « transfert » de Freud (1916), qui permet au patient d'accorder suffisamment de confiance à son psychanalyste pour lui donner accès à ses souvenirs les plus intimes, mais qui le conduit également à une forme d'admiration, voire d'adoration, et donc de confiance dans les idées qu'il peut lui apporter. Une situation également valable pour les métaconceptions : c'est avec l'aide d'un psychothérapeute reconnu tel que Jacques Salomé (2006) que l'on apprend le mieux à construire les métaconceptions de contrôle permettant de reconnaître et d'éviter celles de nos réactions spontanées qui sont malsaines pour nos relations, alors que nous les considérons inconsciemment comme des défenses sensées nous protéger.

La stabilité de nos conceptions dépend aussi, d'une manière à peine différente, de leur degré de consensualité, c'est-à-dire du nombre de personnes qui la portent. Le processus n'est pas nécessairement conscient : une idée entendue partout finit par être considérée comme une évidence, et les conceptions correspondantes sont stabilisées d'autant. C'est notamment le cas des modes et des canons culturels. Il faut un état d'esprit particulier, et des métaconceptions de contrôle particulièrement affûtées, pour déjouer les idées reçues et parvenir à débusquer les évidences ; une compétence que, d'une certaine manière, se doit de posséder tout bon scientifique, et qui semble de plus nécessaire dans l'éducation de base du citoyen.

6.5.4. Intelligibilité, cohérence et nœuds du savoir

Un peu plus loin, Antoine Bello écrit encore : « *On croit plus facilement une histoire si elle confirme une opinion que l'on a déjà* ». Et en effet, intégrer une nouvelle information sera plus facile si elle reste en cohérence avec les conceptions initiales que si elle les met à mal. Une idée qui illustre le premier paramètre de la *théorie du changement conceptuel* (l'*intelligibilité*) évoquée plus haut. A cet égard, toutes les structures de pensée ne sont pas à la même enseigne : une conception très structurante, participant à de nombreux schèmes de pensée, acquise depuis longtemps, sera beaucoup plus stabilisée par sa cohérence avec le reste du savoir qu'une idée légère intégrée sur l'évocation d'un seul exemple d'un phénomène nouveau. Ce type de stabilisation atteint son effet le plus grand lorsque la cohérence est telle, entre plusieurs schèmes de pensée, que l'on peut parler de *paradigme de pensée* : une conception nouvelle s'y inscrivant en retirera un gain de stabilité élevé, à l'inverse d'une conception nouvelle, certes opératoire mais entrant en conflit avec un paradigme dominant chez l'apprenant.

Trois cas illustrent ce qui peut se produire lorsque deux conceptions incompatibles sont entretenues par un même individu :

1. Dans le premier, les deux conceptions appartiennent à des « plis cognitifs » disjoints et elles peuvent coexister, n'entrant jamais en conflit car relevant d'usages dans des situations différentes. Tel scientifique africain, enseignant à l'Ecole normale supérieure d'Abidjan, expliquait ainsi en 2001 les pratiques animistes auxquelles il se livrait pour conjurer le mauvais sort avant de quitter son village[68].
2. Dans le second, les conceptions entrent en conflit. Selon le processus décrit dans le paragraphe *6.3.4.6. Contrôle cinétique et contrôle thermodynamique*, une fois traitée par le site actif de la conception 1, une information ĩ est transformée en une *réponse* ř, qui devient à son tour une information traitée par le savoir, à travers l'utilisation de la conception 2. Si les conceptions 1 et 2 sont incompatibles, l'information ř doit nécessairement créer un conflit cognitif et conduire à la remise en question, soit de l'information ĩ, soit de la pertinence des conceptions utilisées pour traiter ĩ ou ř, soit de l'une des deux conceptions. Une crise de confiance qui se traduit alors par la

[68] Notes autobiographiques.

déstabilisation la valeur de la fonction $\Psi_{cog}(\tilde{\imath})$ et qui nécessite la transformation de l'une ou de l'autre, voire des deux, voire de tout l'échafaudage cognitif construit autour du sujet (un phénomène que les élèves de classes préparatoires aux concours des Grandes Ecoles françaises connaissent bien, contraints d'apprendre trop de choses trop vite, et finissant parfois par voir leur compréhension d'un sujet s'effondrer comme un château de cartes). Les cas de changements de paradigmes de pensée constituent, dans cette catégorie, les apprentissages les plus difficiles (Pellaud, 2011).

3. Dans le troisième, les deux conceptions sont certes incompatibles mais jouissent d'une stabilité similaire et surtout, il est possible de passer facilement de l'une à l'autre. Dans ce cas, illustré par la figure 70, elles peuvent continuer à coexister, étant employée l'une et l'autre en fonction des circonstances. C'est le cas du mouvement apparent du soleil dans le ciel : pour interpréter le jour qui se lève, la conception invoquée est celle du soleil tournant autour de la Terre ; lors de l'appréhension globale du système solaire, c'est la Terre qui tourne sur elle-même. On passe facilement de l'une à l'autre sans les remettre en question pour autant[69].

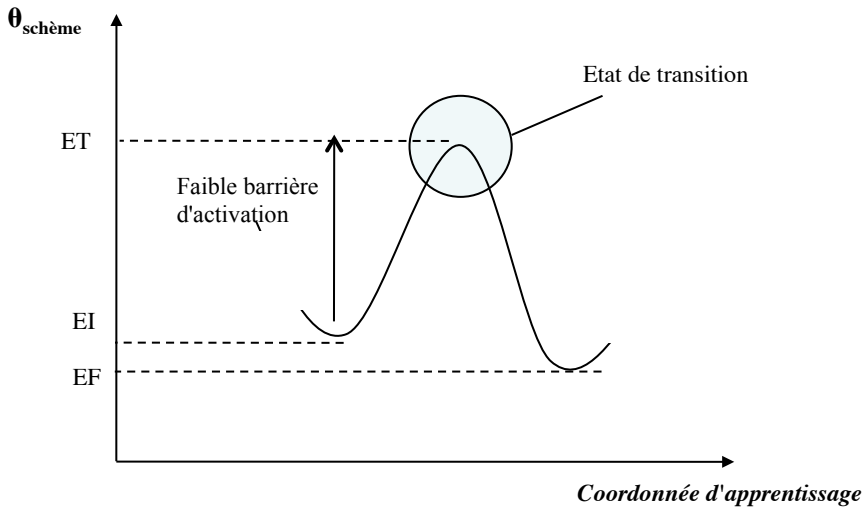


Figure 70 : Coexistence pacifique de deux conceptions contradictoires mais facilement interchangeables.

6.5.5. Valeur émotionnelle

D'un point de vue émotionnel, une conception sera également stabilisée si elle est liée à des idées qui ont de l'importance pour celui qui la porte : valeurs, passions et hobbys, souvenirs forts… autant de choses qu'on ne se résout pas facilement à abandonner, ou même à transformer. Ce que Bello (2007) confirme en écrivant : « *On croit plus facilement à une histoire que l'on aime* ». Qui aimerait découvrir que le hasard extraordinaire qui a présidé à sa rencontre avec son amant n'en était finalement pas un, compte tenu des probabilités que l'événement apparaisse ? Et quel écologiste antinucléaire souhaite faire le compte des sous-produits de la fusion de 20 grammes d'uranium (20 grammes de déchets radioactifs) et de la combustion de 28 tonnes de charbon (100 tonnes de CO_2), qui produisent la même énergie et dégagent la même quantité de radioactivité ? Quel passionné de vie extraterrestre, enfin, se laissera convaincre de l'impossibilité technique d'un voyage interstellaire par des êtres vivants ?

Non seulement les heuristiques émotionnelles sont particulièrement prégnantes, notamment au niveau des métaconceptions comme nous l'avons vu dans le paragraphe *6.3.4.1. La prééminence*

[69] Profitons-en pour signaler ici, même si ce n'est pas le propos, que contrairement à ce qui se fait systématiquement, on ne peut pas opposer les affirmations « c'est la terre qui tourne autour du soleil » et « c'est le soleil qui tourne autour de la terre », le contraire de cette dernière étant « la terre tourne sur elle-même ».

d'heuristiques particulières, mais on se résoud également difficilement à quitter les conceptions qui représentent justement « ce à quoi on tient ». Aussi jouissent-elles d'une grande confiance, et donc d'une stabilité particulière.

6.5.6. Habitus

Dans le paragraphe *6.3.4.1. La prééminence d'heuristiques particulières*, nous avons évoqué un phénomène de « rémanence » conduisant à rendre plus accessible une heuristique ayant servi récemment (qu'elle appartienne à une conception normale ou à une métaconception). A cet effet d'ordre cinétique peut s'en ajouter un autre, d'ordre thermodynamique cette fois : l'usage fréquent d'une conception, surtout s'il est fécond et opératoire, permet de la stabiliser en lui apportant là encore un certain degré de confiance.

De même que l'artisan pourra justifier une technique en disant « *J'ai toujours fait ainsi* », nous sommes sûrs de la pertinence de certaines manières de penser « *parce que nous pensons toujours ainsi* ». La stabilité peut d'ailleurs être temporaire : particulièrement séduit par un nouveau concept ou une nouvelle théorie (la mémétique évoquée plus haut, par exemple), il nous arrive d'avoir tendance à l'employer à tout moment pour interpréter des événements qui ne le méritent pas toujours. L'*habitus* est par suite un paramètre supplémentaire qui apporte de la stabilité à un schème de pensée, une conception, une heuristique ou un site actif, par la création de métaconceptions ou de liens spécifiques.

A l'inverse, une conception insuffisamment utilisée et donc mal étayée peut soit ne pas acquérir la stabilité nécessaire si elle est nouvelle, soit finir par être déstabilisée, comme « oubliée », même si elle est ancienne. Certains modes de raisonnement non intuitifs tels que la « démonstration par récurrence » nécessitent un réel entraînement, destiné non seulement à permettre à l'élève de comprendre « comment » les utiliser, mais également à lui donner confiance dans leur capacité à résoudre certains problèmes. On réalise dès lors que cette stabilité « par habitude » est très proche et complémentaire de l'*accessibilité* que nous décrivions plus haut[70]. Elle permet notamment d'assouplir la conception concernée en l'éprouvant à travers l'usage de plusieurs types de problèmes.

6.5.7. Principe d'économie

Le dernier paramètre régissant la stabilité d'une conception est probablement sa simplicité d'utilisation. Une idée simple est souvent une idée convaincante, de même qu'une théorie économe en concepts et en lois est en général considérée comme séduisante. Un principe qui n'est pas sans rappeler celui du rasoir d'Ockham (ou d'Occam), considéré comme l'un des principes fondamentaux de la science ; attribué au frère franciscain et philosophe Guillaume d'Ockham (16e siècle), il stipule en effet que « *les hypothèses les plus simples sont les plus vraisemblables* » (source : Wikipédia 2011). Plus susceptible d'être intégrée à divers schèmes de pensée, apte à produire des réponses rapides et donc à être considérée comme opératoire, la conception simple jouit donc d'une stabilité accrue, outre la faible charge cognitive que son utilisation entraîne.

6.5.8. Souplesse du savoir

Cette forme de stabilité particulière n'est pas, rappelons-le, visualisable sur les courbes d'activation en 2 dimensions représentées jusqu'ici, mais au niveau de la courbure des puits de potentiel

[70] Suite à cette similarité, nous avons été tentés un temps de rassembler les questions d'accessibilité cinétique au sein d'un concept de « stabilité conjoncturelle », par opposition à la « stabilité structurelle » qui fait l'objet de cette sous-partie 6.4. Cela revenait toutefois à considérer qu'une heuristique plus accessible était plus « stable », ce qui conduisait à des confusions difficiles à surmonter en dépit de l'intérêt que présentait la généralisation de la question de la stabilité. Après de longues tentatives, nous avons abandonné cette option, ce qui a conduit à l'option bien plus féconde consistant à distinguer deux fonctions (Φ_{affin},et $\Phi_{réorg}$) décrivant l'une l'interaction entre le savoir et les informations (et donc l'accessibilité des heuristiques et ce que nous avions auparavant nommé « stabilité conjoncturelle ») et l'autre la stabilité structurelle.

correspondant aux conceptions sur l'hypersurface représentative de la fonction θ (figure 61). Nous l'avons reliée plus haut à une grandeur entropique et il convient encore de préciser comment elle contribue à la stabilité d'un schème de pensée ou d'une conception.

Un schème de pensée « souple », caractérisé par une faible variation de la fonction $\theta_{\text{schème}}(\alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_n)$ et donc par une sorte de « plaine » dans une zone étendue de variation de ses degrés de liberté, est un schème dont la structure peut se modifier facilement, sans variation d'énergie potentielle, c'est-à-dire facilement et sans effort cognitif. Il est adaptable à de nombreuses situations, capable de traiter rapidement des informations diverses sans créer de conflit cognitif ; il est donc très bien « installé » dans l'espace des conceptions. A l'inverse, une information inhibante, par exemple, peut tout à fait « contraindre » le savoir et transformer ce même endroit vaste et accessible en une vallée plus escarpée, lui rendant non seulement l'accès plus difficile par les informations à traiter, mais également affectant sa stabilité en la rigidifiant.

La stabilité des schèmes de pensée est facilement visualisable sur les figures présentées plus haut, si tant est qu'on continue à y percevoir cette dimension transversale. Il peut toutefois être intéressant d'étudier comment cela est susceptible de se traduire si l'on tente de rassembler les effets enthalpique et entropique dans la même grandeur *enthalpie libre*, en les liant par l'équivalent de la température que nous avons défini plus haut (motivation, prédisposition à mobiliser ses ressources cognitives et confiance dans la situation pédagogique).

En vertu de la relation que nous avons vue plus haut, une conception sera d'autant plus stable du point de vue de l'enthalpie libre que les liens qui la constituent seront solides (enthalpie, toujours négative comme toutes les énergies potentielles), que sa souplesse sera grande (entropie, toujours positive et d'autant plus que la souplesse est grande) et que ces trois paramètres « thermiques » (regroupés sous le terme d'*impulsion*) seront développés. Une manière de dire que les conceptions trop rigides résistent moins aux transformations lorsque les conditions intrinsèques favorisant l'apprentissage sont présentes, ce qui est encore plus intéressant lorsque l'on considère non pas les conceptions isolées mais les plis cognitifs ou les paradigmes de pensée.

De nombreux exemples pourraient illustrer ce phénomène entropique, mais celui des langues semble particulièrement approprié. On peut en effet considérer schématiquement que, face à l'apprentissage d'une langue étrangère, les individus se séparent en deux catégories :

1. Les premiers font grand cas des règles grammaticales et syntaxiques, des genres des mots, des cas et des verbes irréguliers. Ceux-là finiront par parler un langage parfait après beaucoup d'effort.
2. Les seconds préservent au contraire à leur connaissance de la langue une très grande souplesse ; pour eux, l'essentiel est de parler. Ils ne pratiquent pas l'autocensure consistant à n'utiliser une tournure de phrase que lorsqu'ils sont sûrs de son emploi et ont de ce fait, en général, une plus grande pratique et un meilleur accent que les autres, mais ils conservent des erreurs grammaticales qui ne pourront s'atténuer ou disparaître qu'à très long terme, voire jamais.

La même distinction existe avec la musique, où se distinguent ceux qui jouent pour jouer et ceux qui joueront lorsqu'ils sauront. Le savoir, lorsqu'il est plus souple, est souvent également moins étayé, moins structuré. Mais parce qu'il est moins sujet aux remises en question, il n'en est pas moins robuste : une barre d'acier est moins rigide qu'une baguette de verre de même diamètre mais, plus souple, elle résiste mieux à la contrainte[71].

6.5.9. Application à la détermination de « profils cognitifs »

Nous avons évoqué plus haut l'importance de ménager, au cours d'un apprentissage, la variation d'entropie d'apprentissage la moins négative possible, correspondant au rétrécissement de la vallée

[71] Les littéraires préféreront la métaphore du chêne et du roseau de La Fontaine.

d'activation le plus faible possible. Mais ces considérations nous conduisent également à tenter de distinguer des « profils cognitifs » différents du point de vue entropique.

A supposer qu'il existe des individus qui, comme pour les langues et la musique, aient un savoir globalement plus « souple » que d'autres, et que les seconds aient construit le leur pas à pas, de manière très fiable et structurée : n'est-il pas prévisible que les premiers présentent de meilleures dispositions que les seconds vis-à-vis de la remise en question de leurs connaissances, et donc de l'apprentissage en général ? Si les seconds feront de bons enseignants (sauf peut-être au moment de comprendre les constructions mentales de leurs élèves lorsqu'elles sont différentes des leurs), les premiers ne feront-ils pas de meilleurs chercheurs, prêts à tout moment à intégrer à leur vision du monde de nouvelles informations parfois contradictoires ?

Il semble en tout état de cause aussi important de disposer d'un savoir souple que structuré ; ces deux caractéristiques sont certes contradictoires, mais comme pour la réactivité de la matière en chimie, c'est dans la tension entre les deux que s'établiront la robustesse du savoir et la capacité à le transformer : trop souple, il reste inconsistant et inopérant ; trop rigide, il bloque les apprentissages et bride l'innovation.

6.6. Conséquences : de nouveaux leviers d'action pour apprendre

Dans le paragraphe *6.4.2.2. Première typologie des processus d'apprentissage*, nous avons déterminé dix types d'apprentissages qui découlaient de la représentation que nous venions de donner du traitement de l'information. Il est à présent possible de compléter et de préciser cette liste à partir des résultats que nous venons d'extraire de la description des processus de transformation des conceptions et des raisons de leur stabilité.

6.6.1. Paramètres génériques

Dans le cadre d'un processus activé tel que ceux auxquels nous avons réduit la quasi totalité des processus d'apprentissage, qu'il s'agisse de la transformation des sites actifs, des heuristiques, des schèmes entiers ou des métaconceptions de contrôle, l'observation de la courbe d'activation (par exemple à la figure 69) fournit plusieurs moyens pour faciliter la transition vers un état de stabilité durable :

1. Augmenter l'*impulsion* à apprendre : c'est probablement le paramètre le plus évident (pour autant que l'apprenant jouisse d'un accompagnement adéquat pour modifier ses conceptions dans la bonne direction), mais aussi l'un des plus difficiles sur lesquels agir de l'extérieur.
2. Abaisser l'énergie potentielle de l'état final ; cela peut être réalisé en jouant sur les différents paramètres identifiés dans la sous-partie *6.5. Stabilisation du savoir*. Cette action suppose toutefois, pour qu'elle ait un effet sur l'énergie d'activation (et donc la facilité de franchissement de la barrière) et pas seulement sur la persistance de l'état final, que l'apprenant puisse se faire une idée de la conception à atteindre, de manière à l'étayer en amont avec l'information pertinente.
3. Elever l'énergie potentielle de l'état initial ; en jouant sur les mêmes paramètres mais dans l'autre sens, l'effet permettra d'abaisser la barrière d'activation. Les deux points suivants en donnent des exemples particuliers.
4. Casser (inhiber) la conception initiale à l'aide d'une expérience contre-intuitive par exemple, de manière à forcer la construction d'une nouvelle conception et la transition vers une autre vallée ; le risque à prévoir étant alors que cette dernière soit mal choisie par l'apprenant.
5. Fournir à l'apprenant une information qui, une fois traitée par la conception à modifier, produise une réponse qui soit analysée comme étant manifestement fausse par d'autres conceptions plus fiables (ce cas a été décrit au paragraphe *6.3.4.6. Contrôle cinétique et contrôle thermodynamique*).

6. Contraindre le savoir en rigidifiant les conceptions correspondant à l'état initial pour créer une déstabilisation d'ordre entropique, en établissant par exemple des liens encore inexistants avec d'autres conceptions qui réduise drastiquement l'exploitation des premières. Une autre approche sera évoquée dans la section *6.6.5. Un effet « template ».*
7. Assouplir les conceptions correspondant à l'état final pour créer une stabilisation d'ordre entropique, en les créant dans des situations qui permettent leur exploitation dans diverses formes de problèmes.
8. Faciliter le passage de l'état de transition. Pour ce faire, les chimistes emploient plusieurs techniques qui sont décrites dans les sections suivantes.

6.6.2. Un effet de « levée de dégénérescence »

Dans le paragraphe *6.4.2.2. Première typologie des processus d'apprentissage*, nous avons évoqué le cas d'heuristiques qui seraient inhibées par une information ou une métaconception de contrôle. Dans ces cas-là, le site actif persiste et n'est inhibé que pour certaines situations. Il est toutefois possible d'imaginer qu'une conception soit totalement déstabilisée, indépendamment de la situation, parce qu'elle est globalement toujours inopérante (on ne dit jamais « *si j'aurais* », par exemple, et la simple juxtaposition de ces trois mots finit par choquer l'oreille).

A la création d'une métaconception de contrôle peut donc se substituer une autre approche, qui consisterait à déstabiliser fortement une conception initiale et à en stabiliser une autre. Graphiquement, cela correspond à une première courbe montante et à une seconde courbe descendante. Si (et seulement si) les deux conceptions font partie du même pli cognitif, alors ces deux courbes peuvent se croiser et on observe ce qu'en chimie on nomme « levée de dégénérescence à l'état de transition ». En termes simples, le système « passe » d'une conception à l'autre à l'endroit où les énergies deviennent similaires, c'est à dire à l'endroit où, sur la figure 71, les courbes se croisent.

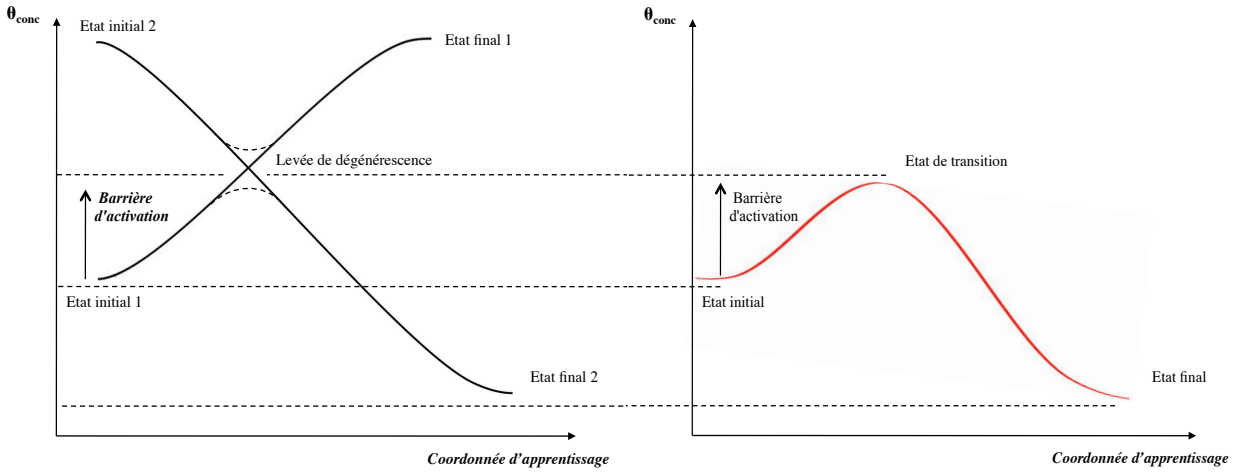


Figure 71 : Effet de levée de dégénérescence dans le processus de déstabilisation-stabilisation de deux conceptions issues d'un même pli cognitif : a/ Stabilisation et déstabilisation des conceptions 1 et 2. b/ Résultat en terme de processus d'apprentissage.

C'est exactement ce qui se produit lorsqu'un outil performant est introduit alors que l'outil précédent commence à trouver ses limites dans les usages nouveaux que l'on tente d'en faire. D'une part, l'outil initial se déstabilise à force de rencontrer des obstacles et d'autre part, le nouvel outil se stabilise en montrant ses réussites là où l'autre échoue.

Par outil, on entend aussi bien les conceptions que les outils intellectuels ou physiques : après avoir

fauché à la faux un champ rempli de cailloux, on abandonnera facilement et définitivement cette dernière (sauf exceptions) pour une débroussailleuse électrique ; on pourrait dire la même chose de la règle à calcul et de la calculatrice électronique. De même, qui a compris la méthode matricielle de résolution des systèmes d'équations linéaires à plusieurs inconnues ne fera plus l'effort d'extraire les valeurs laborieusement ligne à ligne ; on pourrait dire la même chose de l'usage du discriminant pour la résolution des équations du second degré par rapport à l'extraction des racines par la factorisation de carrés. En physique, on abandonne quasiment le principe fondamental de la dynamique lorsqu'on découvre le théorème de conservation de l'énergie mécanique, alors que les chercheurs en théorie de l'évolution culturelle dépassent nécessairement la théorie *mémétique* lorsqu'ils tentent d'approfondir la question.

6.6.3. Un « effet tunnel » cognitif

La théorie du changement conceptuel précise qu'un des paramètres favorisant l'apprentissage consiste en la possibilité pour l'apprenant d'entrevoir la conception vers laquelle il doit faire évoluer son savoir. Que cela signifie-t-il dans notre représentation des processus d'apprentissage ? Peut-être qu'en voyant « à travers » la barrière d'activation, il la passe plus facilement. Cette sorte « d'effet tunnel », pour poursuivre dans l'analogie physicaliste allostérique, peut être justifié de quatre manières différentes :

1. L'apprenant sait alors quelle vallée emprunter si par hasard il en existe plusieurs possibles (car on ne peut exclure qu'une grande motivation à apprendre ne facilite dans certains cas un apprentissage faux car précipité et insuffisamment réfléchi).
2. Entrevoyant l'état de savoir dans lequel il doit se retrouver, il peut s'y préparer et réduire la contrainte entropique en envisageant la transformation au plus près de la trajectoire d'énergie minimale (au contraire de la figure 65).
3. Il peut également prévoir la forme que prendra l'état de transition et le stabiliser en l'étayant avec des métaconceptions de contrôle qui l'aident à opérer la transformation.
4. Il peut surtout commencer à prévoir le gain énergétique à venir et, ce faisant, admettre une plus grande déstabilisation psychologique qu'il ne le ferait dans le cas où il devrait renoncer à sa conception de départ sans savoir encore par quoi la remplacer.

Tous ces cas de figure ne sont bien entendu possibles que dans le cas où l'apprentissage s'effectue dans le cadre de la *zone proximale de développement* de l'apprenant… le tout avec l'aide de l'enseignant avisé de l'existence de ces paramètres.

Enfin, bien que ce ne soit pas le cas le plus recherché, il est assez clair que par un effet similaire à celui que les chimistes nomment « postulat de Hammond », ces quatre effets seront plus importants si l'état final est proche en structure de l'état de transition.

6.6.4. Un effet « catalyse »

Plus une transformation du savoir nécessite une grande réorganisation, plus la déstabilisation intermédiaire est importante : l'apprenant doit en effet accepter de remettre en question plusieurs de ses schémes explicatifs et, même si les nouvelles conceptions à élaborer sont stables, cette phase préliminaire se traduit par une forte augmentation de la valeur de la fonction θ d'apprentissage, avant que la mise en place des nouveaux éléments ne provoque le passage de l'état de transition.

Or en synthèse chimique, il arrive souvent qu'au cours d'une transformation complexe, certaines étapes du mécanisme réactionnel nécessitent une réorganisation importante, c'est-à-dire la rupture de liens nombreux et solides avant que les nouvelles liaisons ne viennent restabiliser l'édifice. Une solution, dans ces cas-là, ne consiste pas à agir sur la trop haute barrière d'activation, mais à remplacer l'étape problématique par une succession d'étapes plus simples, par l'introduction d'un réactif

particulier qui, par exemple, commencera par casser une seule liaison en se liant à l'un des réactifs, activant ce dernier vis-à-vis de l'action du second réactif avant d'être libéré dans la solution et de recommencer son office.

On parle alors de « catalyse », le catalyseur étant cette substance régénérée à chaque cycle, dont l'unique rôle est de créer des étapes intermédiaires de plus faibles énergies d'activation. C'est ce que montre la figure 72, où le phénomène a été transposé à la question de l'apprentissage. La voie normale et la voie catalysée y ont été superposées (bien qu'elles correspondent à des coupes totalement différentes dans l'hypersurface d'énergie puisque la présence du catalyseur fait « passer » le système par une autre voie d'apprentissage, c'est-à-dire par d'autres vallées, cols et puits de potentiel, qui constituent un détour, mais de moindres dénivelés).

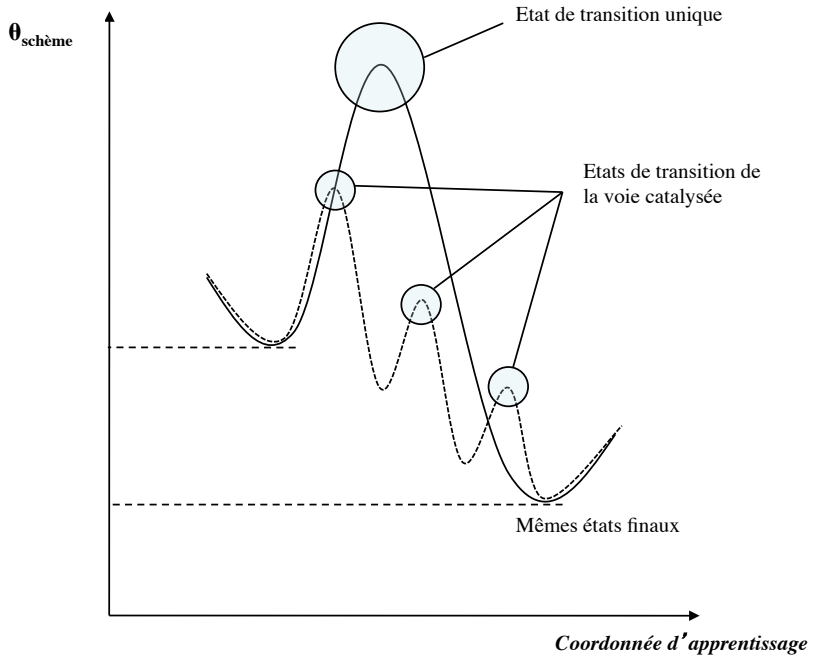


Figure 72 : Juxtaposition des courbes d'activation d'une voie normale très activée et de la voie catalysée plus facile à emprunter.

Il est très probablement possible d'imaginer un effet catalytique similaire en matière de processus d'apprentissage, et nombre d'enseignants s'en acquittent intuitivement en séquençant l'approche pédagogique de manière à ne pas introduire trop de nouveauté en une fois. Toutefois, ce que le schéma montre, c'est qu'il est tout à fait envisageable de passer par un état intermédiaire (« l'intermédiaire réactionnel » pour les chimistes) qui soit très instable par rapport aux états initial et final. Créer une conception intermédiaire inopérante pour faciliter la transition vers une construction plus pertinente est probablement inhabituel ; il est toutefois possible que ce soit efficace dans certains cas.

C'est d'ailleurs, d'une certaine manière, ce qui se produit lorsqu'on demande à un étudiant en science d'abandonner sa vision corpusculaire de l'électron et de la remplacer par une vision ondulatoire. L'état de savoir est alors extrêmement déstabilisé, car il est difficile à comprendre comment ce qu'on a toujours visualisé comme une petite bille est alors capable de conserver les propriétés qu'on lui attribuait sous cette forme. Mais sans cette phase de déstabilisation, corrigée ensuite par une approche plus nuancée où l'électron n'est plus considéré ni comme une particule, ni comme une onde, mais comme une entité possédant des propriétés relevant de ces deux types d'objets, il serait probablement difficile de faire entrer les étudiants dans la physique quantique.

6.6.5. Un effet « template »

Nous avons évoqué plus haut un effet entropique, sur lequel il semble possible d'agir de diverses manières pour faciliter la transformation du savoir : en particulier, conserver à l'esprit l'importance de préserver une certaine souplesse de l'état de transition, et viser la construction de conceptions qui ne soient pas trop rigides constituent probablement deux approches pédagogiques pertinentes. Pour atteindre le second objectif, c'est probablement la diversité des situations dans lesquelles la nouvelle conception intervient de manière efficace (Pellaud & Giordan (2002) parlent de « mobilisation des connaissances ») qui peut permettre de l'assouplir et de créer des heuristiques larges et accessibles. Mais pour ce qui est du premier, rien ne remplacera l'accompagnement individualisé au moment du passage de l'état de transition, pour permettre à l'apprenant de lâcher prise sur les savoirs qu'il est en train de bousculer et pour rassembler les notions dont il a besoin (et seulement celles-ci).

Une autre approche théoriquement possible pourrait consister à tenter de rigidifier les conceptions de départ des apprenants, qu'elles soient correctes et incomplètes ou erronées. Bien qu'une approche pédagogique permettant un tel effet semble peu vraisemblable, il peut être intéressant de regarder à nouveau du côté des chimistes. Ces derniers ont de fait inventé un effet dit « template » (de l'anglais « gabarit »), qui consiste à employer un catalyseur particulier dont le rôle est de rassembler autour de lui (par des interactions de diverses natures) les réactifs qui devront se lier entre eux ensuite. Ce faisant, il rigidifie l'état initial du système et diminue l'entropie d'activation. L'effet « template » est donc un effet de contexte un peu particulier, car contrôlé et non plus subi.

Reste à imaginer des situations pédagogiques où un effet similaire pourrait se produire ; pour ce faire, il faudrait considérer une information qui « attire à elle » les bonnes structures cérébrales (schèmes, conceptions, heuristiques, sites actifs) dans une configuration qui les prédispose à se transformer dans une certaine direction. Une autre manière d'ailleurs d'atteindre l'un des paramètres décrits par la théorie du changement conceptuel voulant que la conception à atteindre soit « visible » depuis le point de départ. Mieux que l'information, l'outil de pensée (également appelé « aide à penser » dans l'environnement didactique de 2002) peut jouer ce rôle de *template* : métaphore ou analogie, moyen mnémotechnique, schéma simplifié, routine… autant de moyens permettant la pré-organisation des ressources cognitives autour de la réalisation d'une tâche donnée.

Enfin, si le rôle de *template* peut être joué par une information ou un outil de pensée, il peut également l'être par une expérience. Celle du ludion en particulier, qui sera décrite dans la partie expérimentale *8. Mise à l'épreuve du modèle allostérique formalisé*, nous semble propice à exercer un « effet template » en obligeant, par une observation attentive, à convoquer les notions de pression, de poids et de poussée d'Archimède autour d'un petit objet creux plongé dans un récipient d'eau fermé sur lequel on appuie (figures 73a et 73b).

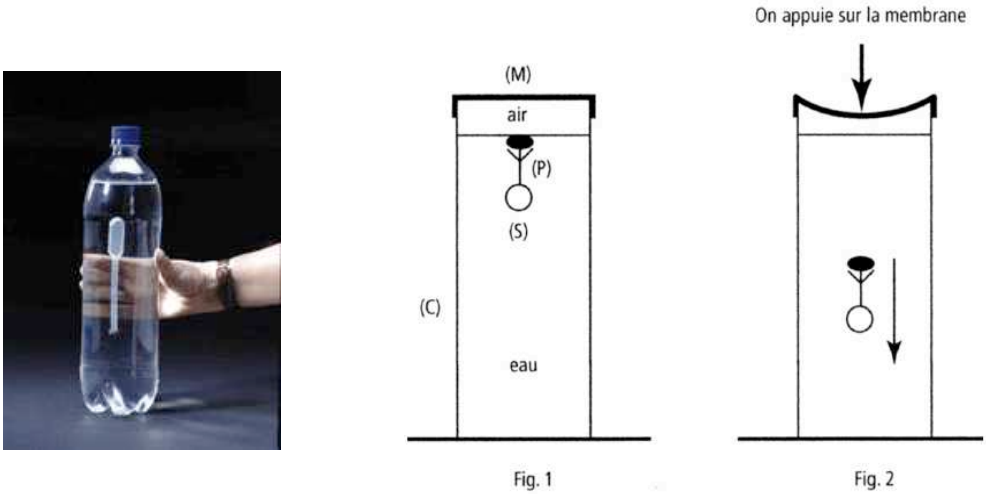


Figure 73 : Représentations photographique et schématique de l'expérience du ludion.

6.6.6. Des contrôles cinétique et thermodynamique

Cette notion a déjà été abordée dans le cas du traitement de l'information et il n'est pas étonnant qu'on la retrouve ici, dans l'espace de la réorganisation des conceptions, puisque le phénomène est susceptible de se présenter à chaque fois que deux voies possibles, sur une hypersurface d'énergie potentielle, conduisent à des états de stabilités différentes en passant par des états de transition dont les stabilités relatives sont inversées par rapport à celles des produits (figure 74).

Il est d'ailleurs étonnant de constater le degré de généralité de ce concept : les chimistes, apparemment prompts à appliquer leurs résultats à d'autres domaines que le leur, aiment comparer les affinités moléculaires aux affinités relationnelles entre personnes. Ainsi, lors d'une rencontre entre deux personnes étrangères (c'est le cas des relations professionnelles, amicales, amoureuses…), il est souvent nécessaire de surmonter une barrière d'activation plus ou moins élevée : on aura de l'antipathie pour untel, alors qu'unetelle nous aura inspiré un véritable coup de foudre. Sous contrôle cinétique, les relations se font au gré des affinités immédiates. Il en va en revanche différemment de la stabilité des relations, placées elles sous le contrôle thermodynamique du temps et des événements vécus en commun. Or rien ne garantit qu'une relation commencée par un coup de foudre conduise à un état stable et durable (Schurmans & Dominice, 1998) ; à l'inverse, bien des relations commencées froidement conduisent à des liens indéfectibles une fois la barrière d'activation franchie.

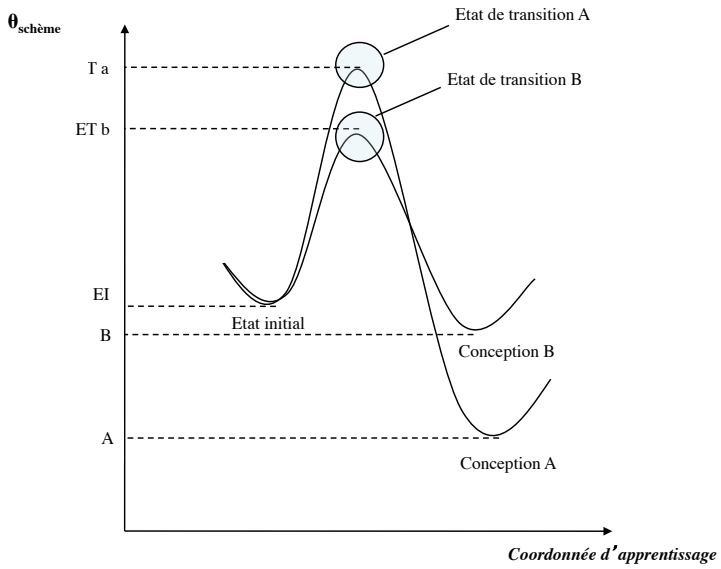


Figure 74 : Cas général représentant une situation permettant des contrôles cinétique et thermodynamique conduisant à des conceptions différentes.

Pour ce qui concerne les processus d'apprentissage, on conçoit que ce type de situations existe, bien qu'elles ne constituent pas le cas général : il est tout à fait possible d'évoluer vers une conception facile à élaborer sous contrôle cinétique, avant de réaliser son erreur, de faire machine arrière et de construire une autre conception, moins facile à construire mais de plus grande stabilité.

Un exemple particulièrement probant vient illustrer cette idée. Lors de l'une des séances de l'*Atelier des expériences impossibles* ayant servi de base à la recherche présentée dans la partie expérimentale *8. Mise à l'épreuve du modèle allostérique formalisé*, une expérience (déjà évoquée dans le paragraphe *5.4.1. Support expérimental de la recherche*) consistait à effectuer une mesure des températures respectives d'une chaussette de laine repliée sur elle-même et d'une feuille d'aluminium roulée en boule. Les deux objets étaient placés sur une table et présentaient un orifice dans lequel on pouvait glisser l'extrémité d'un thermomètre relativement sensible (et dépourvu d'inertie thermique), sans

avoir besoin de les toucher. L'objectif était en effet de mettre en évidence la notion de *température ambiante*, commune à la plupart des objets et en dépit de l'intuition qui laisse penser, par exemple, que la laine serait plus chaude que l'aluminium parce qu'on porte des pulls en laine en hiver[72].

Un garçon d'une dizaine d'années fit l'expérience après avoir prédit que la laine serait la plus chaude[73]. Mesurant une température identique, il nota le résultat sur sa feuille de route. Interrogé sur la surprise que lui causait cette observation, il répondit simplement « *Je pense que la laine, c'est fait avec de l'aluminium* ». Outre le fait que cette anecdote montre qu'une expérience contre-intuitive est susceptible de favoriser des conceptions plus erronées que celles qu'elle prétendait remplacer, elle illustre particulièrement bien la notion de contrôle cinétique : temporairement, ce garçon avait stabilisé une conception immédiatement opératoire qui lui permettait de rendre compte de l'observation qu'il venait de faire (conception B sur la figure 74). Mais cette conception B pouvait elle résister au contrôle thermodynamique ? Probablement pas : une fois arrivé chez lui, si l'animateur n'avais pas passé un peu de temps à lui expliquer son erreur, sa maman lui aurait probablement dit qu'il avait dû mal comprendre s'il lui avait raconté ce qu'il avait « appris », que la laine était d'origine organique et provenait des moutons alors que l'aluminium était issu de l'électrolyse de la bauxite, un minerais terrestre : l'effet de stabilisation dû à l'ascendant de sa maman et à l'incompatibilité probable de sa nouvelle conception avec certaines de ses autres connaissances l'aurait conduit à remettre la conception B en question. Il n'est pas pour autant certain qu'il aurait atteint la conception A, à l'inculcation de laquelle l'expérience était destinée ; il est au contraire tout à fait probable qu'il serait retourné à son état initial, oubliant l'expérience de la laine et de l'aluminium et pensant « qu'il aurait mal compris ».

6.6.7. Des effets d'affinité temporaire

L'anecdote de la laine en aluminium peut également être interprétée d'une autre manière au sein de notre cadre théorique. Dans le paragraphe précédent, nous avons fait l'hypothèse que l'expérience provoquait une modification réelle et durable des conceptions de l'enfant, subsistant temporairement au-delà du temps de l'expérience ; en ce sens, nous avons raisonné sur la fonction $\Phi_{\text{réorg}}$. Mais c'est oublier que c'est la fonction Ψ_{cog} qui régit les processus cognitifs, et que la réaction de l'enfant pourrait également être interprétée à la lumière d'une stabilisation de la fonction $\Phi_{\text{affin}}(\tilde{\imath})$. En effet, une information perturbante est tout à fait capable, dans ce cadre, de se lier temporairement à une conception totalement erronée, qui pourra même être formulée si l'interaction est suffisamment forte et qu'aucune autre option cognitive n'est possible. Dans ce cas, l'idée ne durera que le temps de l'expérience : une fois l'information oubliée, il ne restera rien.

La différence entre les deux interprétations dépend de la mémorisation ou non de l'information fournie par l'expérience. Si elle est retenue, comme ce fut le cas pour cet enfant, c'est sur $\Phi_{\text{réorg}}$ qu'il faut effectivement raisonner ; invoquer le contrôle thermodynamique est alors légitime. Sinon, c'est sur $\Phi_{\text{affin}}(\tilde{\imath})$ qu'il faudra le faire. La réalité est en général probablement hybride, chacun des deux processus jouant un rôle partiel dans l'interprétation de l'expérience, ce qui attire l'attention sur le risque qu'il y aurait à établir une séparation trop étanche entre les deux fonctions.

6.7. Contrôles péricognitifs

Partis de modèles très orientés vers les aspects cognitifs de la pensée, et bien que reconnaissant l'importance des soubassements de la pensée (*infracognition*), de la *perception*, de l'*intention* et de la

---

[72] Notons que cette conception n'est pas la seule ayant cours : de nombreuses personnes indiquent que c'est l'aluminium qui est le plus chaud, car on en recouvre les grands brûlés pour les protéger du froid.

[73] Nous avons conscience du fait que la difficulté de l'exercice réside peut-être moins dans la notion de température ambiante que dans l'ambiguïté de la notion de « chaleur » : dans le langage courant, un pull est « chaud » parce qu'il conserve la chaleur autant qu'un fer à repasser est chaud parce qu'il est branché.

motivation, mais aussi du propre regard de l'apprenant sur ses apprentissages (*métacognition*) et de l'*émotion* (niveau *affectif*), nous avons tenté d'intégrer davantage ces dimensions *péricognitives* dans notre construction théorique des processus d'apprentissage, de les caractériser et d'en donner des représentations. Il est donc important de nous interroger sur le degré de description que nous sommes parvenus à en donner et, par conséquent, sur les limites du nouveau modèle sur ces différents plans.

6.7.1. Le niveau infracognitif

Après le niveau cognitif, c'est probablement le niveau le mieux décrit par le modèle allostérique formalisé si l'on en exclut les aspects émotionnels pour leur faire constituer un autre niveau. Par l'introduction des notions d'heuristiques d'une part, d'inhibition d'autre part, et de (méta)conceptions de contrôle enfin, ce modèle fournit en effet une caractérisation et une représentation précises des soubassements de la pensée et des processus inconscients qui régissent le traitement de l'information. L'évocation du socle inné des connaissances, des paradigmes de pensée et des plis cognitifs s'inscrit également dans la description de ce niveau. Nous avons déjà évoqué les différentes implications que ces différents paramètres pouvaient avoir en termes d'apprentissage.

On notera que l'emploi du terme « métaconception » a été introduit pour caractériser des conceptions agissant en amont des conceptions portant les sites actifs lors du processus de traitement de l'information ; à cet égard, elles sont « méta » par rapport aux conceptions mais, puisque du point de vue du savoir, elles relèvent de processus parfois inconscients, elles appartiennent au niveau infracognitif et son « infra » par rapport au savoir. L'emploi du terme « métaconception de contrôle », que nous avons utilisé comme extension du premier, permet toutefois de lever partiellement l'ambiguïté.

6.7.2. Le niveau perceptif

Ce niveau n'est probablement pas aussi important pour les apprentissages scolaires définis par les programmes actuels que pour l'éducation thérapeutique du patient, même s'il s'applique largement à la pratique sportive. Nous limitant à la didactique des sciences, nous avons tout de même abordé la question de la perception visuelle (avec l'exemple de la figure 30) mais il aurait été intéressant de s'intéresser à l'audition, au toucher et à la motricité fine qui interviennent parfois dans les processus d'apprentissage. Les implications en termes d'apprentissage des quelques considérations que nous avons pu développer sur ce thème sont minces mais intéressantes, dans la mesure où elles invitent à se méfier des biais perceptifs liés aux effets de contexte, et en particulier de rémanence.

6.7.3. Le niveau intentionnel

Le niveau intentionnel a été assez précisément abordé dans le cadre de l'évocation de l'*effet tunnel cognitif* (section *6.6.3.*), qui renvoyait lui-même à la théorie du changement conceptuel en ce sens qu'elle stipule qu'une aide à l'apprentissage consiste à « se faire une idée du résultat » avant de bousculer ses conceptions. Reste que c'est au niveau des applications pédagogiques que ce niveau est intéressant, applications qu'il faudra déduire de ces résultats théoriques pour qu'ils prennent tout leur sens.

6.7.4. Le niveau motivationnel

Comme le niveau intentionnel, le niveau motivationnel a été représenté précisément grâce aux notions de *barrière d'activation* et d'*impulsion*. Sa caractérisation ne préjuge toutefois pas des moyens nécessaires pour la susciter ; mais ces moyens ont été décrits largement par ailleurs, et notamment dans la version de l'environnement didactique de 2002. Reste qu'une manière de susciter la motivation sera tout de même de la « forcer », par le biais d'expériences contre-intuitive par exemple,

dont le rôle est de déstabiliser suffisamment une conception initiale pour obliger l'apprenant à en trouver une autre, et donc à franchir un ou plusieurs état(s) de transition.

6.7.5. Le niveau métacognitif

Dans notre modèle, le niveau métacognitif correspond, pour l'apprenant, à la prise de conscience et à la compréhension de son niveau infracognitif. En effet, les notions d'heuristiques, d'inhibition, de métaconceptions de contrôle, de paradigmes de pensée et de plis cognitifs deviennent métacognitives lorsque l'apprenant apprend à les dépasser. Ce constat est riche en implications pédagogiques puisqu'il invite l'enseignant à prendre lui-même connaissance de ces éléments cognitifs chez ses élèves pour mieux les leur faire découvrir.

Par ailleurs, le fait pour un individu de prendre conscience de l'efficience ou de l'inefficience d'un raisonnement, ou de voir une personne ayant un ascendant sur lui valider ou invalider une idée, contribuera à accroître ou à diminuer la disponibilité de telle heuristique ou sa confiance à l'égard de telle conception. On peut donc également considérer que certains aspects liés à la stabilité des schèmes de pensée entrent dans le cadre de la métacognition.

A ces différents égards, ce niveau peut être considéré comme étant relativement bien traité dans le modèle allostérique formalisé, même si là encore, le véritable intérêt de son traitement théorique résidera dans les applications pédagogiques qu'il permettra d'en déduire.

6.7.6. Le niveau émotionnel (ou affectif)

Pour ce qui concerne le traitement du niveau émotionnel, nous avons invoqué l'étude de Houdé et Tzourio-Mazoyer (2003) pour préciser le contrôle inhibiteur que peuvent exercer les émotions sur certaines heuristiques, voire l'inhibition émotionnelle de conceptions entières que peuvent induire des situations de stress sur un élève en parfaite maîtrise de ses moyens en temps normal. Ces deux expériences fourniront quelques pistes d'un point de vue pédagogique.

Nous avons également précisé l'importance du rôle de l'émotion sur la stabilisation de certaines conceptions « auxquelles ont tient » d'un point de vue affectif par rapport à celles qui sont fondées rationnellement. Ce point est probablement le plus intéressant, en ce sens qu'il incite à prévoir des environnements affectifs favorables pour faciliter les apprentissages, plutôt que de les proposer sous la forme désincarnée que les disciplines académiques affectionnent parfois, pour des raisons de rigueur et d'objectivité légitimes mais souvent anti-pédagogiques.

La caractérisation d'heuristiques dites « affectives » (telles que celle de la jalousie évoquée plus haut) et l'évocation des effets de « transfert » lors de la stabilisation de conception complètent ces aspects, et il est intéressant de constater que les niveaux intentionnel et motivationnel se mêlent parfois au niveau émotionnel lorsqu'on apprend dans certaines conditions. L'une d'entre elles est l'état amoureux : peu d'apprentissages sont impossibles lorsqu'on est porté par l'*innamoramento* (Alberoni, 1993) et qu'on souhaite partager le hobby de l'être aimé ou simplement le surprendre. Bien entendu, les applications pédagogiques de cet effet sont délicates à mettre en œuvre à l'école, comme Brassens l'avait lui-même imaginé dans *La maîtresse d'école* (encadré ci-dessous). Mais il doit tout de même être possible d'imaginer des situations dans lesquelles le désir d'apprendre est stimulé par des effets affectifs. Pour preuve, le journal *Le Monde* annonçait le 14 août 2012 le lancement en décembre 2011 d'une initiative pédagogique originale (bien que totalement sexiste) par une japonaise diplômée en architecture de l'université de Nottingham, sous le titre « Des mannequins dénudés dispensent des cours de chinois en ligne »[74].

[74] www.sexymandarin.com - Dernière consultation le 05/02/2013.

« A l'école où nous avons appris l'A B C
La maîtresse avait des méthodes avancées.
Comme il fut doux le temps, bien éphémère, hélas.
Où cette bonne fée régna sur notre classe,
Régna sur notre classe.

Avant elle, nous étions tous des paresseux,
Des lève-nez, des cancres, des crétins crasseux.
En travaillant exclusivement que pour nous,
Les marchands de bonnets d'âne étaient sur les genoux, Étaient sur les genoux.

La maîtresse avait des méthodes avancées:
Au premier de la classe elle promit un baiser,
Un baiser pour de bon, un baiser libertin,
Un baiser sur la bouche, enfin bref, un patin,
Enfin bref, un patin.

Aux pupitres alors, quelque chose changea,
L'école buissonnière n'eut plus jamais un chat.
Et les pauvres marchands de bonnets d'âne, crac!
Connurent tout à coup la faillite, le krach,
La faillite, le krach.

Lorsque le proviseur, à la fin de l'année,
Nous lut les résultats, il fut bien étonné.
La maîtresse, elle, rougit comme un coquelicot,
Car nous étions tous prix d'excellence ex-aequo,
D'excellence ex-aequo.

A la récréation, la bonne fée se mit
En devoir de tenir ce qu'elle avait promis.
Et comme elle embrassa quarante lauréats,
Jusqu'à une heure indue la séance dura,
La séance dura.

Ce système bien sûr ne fut jamais admis
Par l'imbécile alors recteur d'académie.
De l'école, en dépit de son beau palmarès,
On chassa pour toujours notre chère maîtresse,
Notre chère maîtresse.

Le cancre fit alors sa réapparition,
Le fort en thème est redevenu l'exception.
A la fin de l'année suivante, quel fiasco!
Nous étions tous derniers de la classe ex-aequo,
De la classe ex-aequo!

A l'école où nous avons appris l'A B C
La maîtresse avait des méthodes avancées.
Comme il fut doux le temps bien éphémère, hélas!
Où cette bonne fée régna sur notre classe,
Régna sur notre classe. »

La Maîtresse d'école – Georges Brassens (1989)

Le modèle allostérique permet également d'évoquer les aspects émotionnels inconscients, qui jouent assurément un rôle majeur dans les apprentissages (et en particulier dans leur inhibition) ; il est notamment possible d'affirmer que les mauvais souvenirs d'école (ou de science) créent des blocages et des résistances quand les bons entretiennent longtemps la soif et la facilité d'apprendre, comme le montre *Le blog des traumatismes scientifiques* que nous avons mis en place pour l'association *Les Atomes Crochus* en 2009[75]. Peut-être ces souvenirs de science s'accompagnent-ils de la création de métaconceptions de contrôle d'un type particulier, qui permettent de raviver des émotions anciennes ; à cet égard, le modèle formalisé est peu explicite et le traitement de cet aspect émotionnel en constitue vraisemblablement une limite.

[75] http://traumasciences.atomes-crochus.org - Dernière consultation le 05/02/2013.

6.8. Cohérence théorique et validation de l'hypothèse de recherche *H1*

L'ensemble des développements qui précèdent montre qu'il a été possible d'effectuer un rapprochement pertinent et souvent fécond entre la description des processus d'apprentissage par les sciences cognitives et la théorie de la réactivité chimique, et ce dans le cadre général du modèle allostérique. Mieux, plusieurs prévisions du modèle développé plus haut paraissent pouvoir constituer des pistes intéressantes pour les recherches à venir, aussi bien du point de vue de la didactique des sciences que des neurosciences et de l'imagerie cérébrale, ou qu'encore de celui de la philosophie des sciences. De ce point de vue, la première hypothèse de recherche peut être considérée comme étant corroborée.

Il semble désormais possible de valider à ce stade la cohérence théorique de l'analogie allostérique, même s'il en faudra davantage pour valider cette approche comme une théorie complètement opératoire, plusieurs des résultats obtenus posant des questions nouvelles qui nécessiteront un rapprochement avec la pratique. C'est ce à quoi nous nous emploierons dans les deux parties suivantes.

7. PREVISIONS DU MODELE : IMPLICATIONS ET APPLICATIONS PEDAGOGIQUES (H2)

« L'enseignant est celui qui, à travers ce qu'il professe, peut vous aider à découvrir vos propres vérités. [C'est] un médiateur qui aide chacun à se comprendre, à se connaître. »

Edgar Morin (2002), sociologue français.

L'objectif de cette partie consiste à corroborer notre deuxième hypothèse de recherche.

Hypothèse 2:	*Ce modèle formalisé permet, par déduction directe des éléments théoriques ainsi construits, l'élaboration d'environnements didactiques compatibles avec les connaissances pédagogiques actuelles. Il permet d'en interpréter, d'en perfectionner certaines, voire d'en produire de nouvelles, inédites ou insuffisamment explicitées.*

Elle y répond en élaborant plusieurs environnements didactiques déduits directement du modèle formalisé, avant de montrer qu'on y retrouve les paramètres de l'environnement didactique de 2002 et de s'exprimer sur la fécondité pratique de la théorie allostérique.

7.1. Vers de nouveaux environnements didactiques

7.1.1. Principe et méthode

Dans le paragraphe *6.4.2.2. Première typologie des processus d'apprentissage* et la sous-partie *6.6. Conséquences : de nouveaux leviers d'action pour apprendre*, nous avons fait émerger les paramètres significatifs sur lesquels il apparaissait possible d'agir pour apprendre, en exploitant de manière systématique les éléments théoriques sur lesquels ils reposaient. Dans la première, on s'appuyait sur les descriptions du savoir et des processus cognitifs de traitement de l'information qui venaient d'être faites, alors qu'on exploitait dans la seconde les idées d'*activation* et de *stabilité* des schèmes de pensée pour imaginer de nouveaux leviers de transformation et d'ancrage des conceptions.

Dans les deux cas, ces paramètres et leviers ont été décrits dans le cadre de l'analogie allostérique, avec les concepts théoriques qui y ont été développés, c'est-à-dire avec les outils descriptifs de l'apprentissage correspondant aux niveaux 1, 2 et 3 de la typologie du paragraphe *6.3.3.4. Différents niveaux de description du savoir*. Or ces descriptions théoriques n'ont de sens, compte tenu de la perspective qui est la nôtre, que si elles peuvent être traduites en des termes et des recommandations directement et facilement exploitables par les praticiens de l'enseignement et de la communication, c'est-à-dire relevant des niveaux 4 et 5 de cette typologie.

Dans ce qui précède, nous avons commencé à tisser des liens avec le quatrième niveau en proposant plusieurs exemples d'approches pédagogiques illustrant systématiquement le propos théorique. Il reste toutefois à adopter une démarche plus systématique consistant à traduire chaque élément théorique en une recommandation pédagogique générale. En outre, il serait à présent utile de rassembler l'ensemble des éléments développés dans la partie théorique *6. Formalisation du modèle allostérique* et d'en faire une synthèse permettant de visualiser simplement et simultanément les divers paramètres dont il est nécessaire de se préoccuper pour favoriser les apprentissages. C'est ce que nous nous proposons de faire dans les sections suivantes.

A cette fin, on suivra une approche centrifuge consistant à partir des résultats les plus théoriques et à les traduire de proche en proche dans les niveaux de description suivants, passant ainsi du plus formel au plus pratique. Ce traitement pourra faire l'objet de représentations sous forme de cartes conceptuelles (ou conceptogrammes), sur le modèle de l'environnement didactique de 2002 élaboré par Giordan et Pellaud (figure 20) ; mais il comprendra davantage de niveaux. On y retrouvera bien le niveau *cognitif* décrivant les actions à entreprendre par l'individu pour apprendre, conduisant lui-même à un niveau périphérique *pédagogique* précisant les actions à entreprendre par l'enseignant pour faciliter ou déclencher les actions de l'apprenant. Mais on y ajoutera deux niveaux théorique *allostériques* qui, en s'introduisant en amont du niveau *cognitif*, viendront sous-tendre l'ensemble de ses paramètres constitutifs, de sorte qu'ils apparaissent comme de véritables prédictions du modèle allostérique formalisé (figure 75). Le premier niveau allostérique sera le niveau formel décrivant « ce qui se passe au niveau des fonctions, hypersurfaces et courbes d'apprentissage » ; le second sera plus phénoménologique et décrira « ce qui se passe dans l'espace des conceptions ». On remarque que ces deux niveaux non seulement sous-tendent les deux niveaux périphériques de l'environnement didactique de 2002, mais qu'ils explicitent en outre le rectangle blanc qui portait la mention « Transformer ses conceptions » dans la section *3.3.4. L'ensvironnement didactique*.

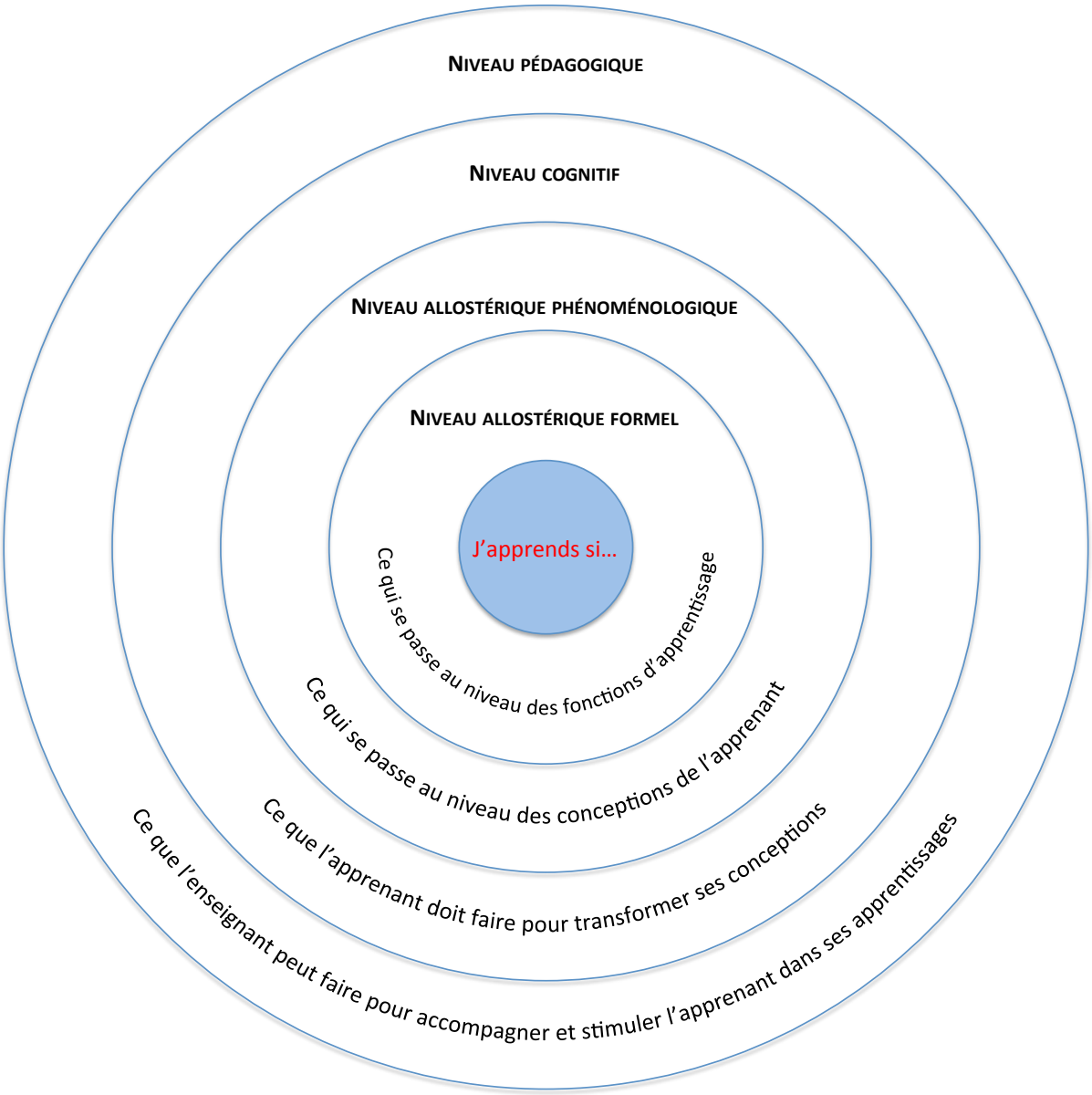


Figure 75 : Représentation générique des environnements didactiques qui seront déduits de la partie théorique.

Notons que dans certains environnements didactiques, lorsque les paramètres décrits s'appliqueront à la structure et à l'organisation du savoir notamment, la description ne pourra pas être visualisée formellement en termes de fonctions d'apprentissage Ψ, Φ ou θ qui décrivent ses transformations. Dans ces cas là, le premier des quatre disques concentriques sera utilisé pour distinguer les grandes catégories de paramètres théoriques significatifs pour la facilitation des apprentissages, séparées dans le schéma par des rayons.

D'un point de vue méthodologique, nous nous inspirerons toujours d'un niveau inférieur pour élaborer les recommandations d'un niveau donné : les deux premiers niveaux étant très théoriques, ils seront directement reliés à la description théorique du modèle allostérique ; mais les deux niveaux suivants, et en particulier le dernier, seront remplis plus intuitivement, en fonction des idées fournies par les deux premiers. Ainsi le cœur des environnements didactiques peut-il être considéré comme « dur », cette dureté se réduisant lorsque l'on s'écarte du centre. A cet égard, les recommandations pédagogiques périphériques doivent être considérées comme des exemples de propositions, que tout enseignant peut compléter à sa manière, en fonction de son expérience, comme nous l'avons fait nous-mêmes[76].

Une dernière étape consistera alors à confronter les nouveaux environnements didactiques avec celui de 2002, conçu empiriquement, de manière à vérifier qu'ils sont compatibles et que les nouveaux mentionnent l'ensemble des paramètres de l'ancien. Le cas échéant, on pourra commencer à être fondé à parler de « théorie allostérique de l'apprendre », même si nous considérerons encore nécessaire de l'éprouver expérimentalement sur quelques prévisions spécifiques, ce qui sera fait dans la partie expérimentale *8. Mise à l'épreuve du modèle allostérique formalisé*.

7.1.2. Plusieurs environnements différents

Parce que les prévisions et implications du modèle sont trop nombreuses pour être toutes représentées sur un même dessin, on les répartira selon les quatre grandes catégories descriptives qui ont fait l'objet de développements spécifiques dans la partie théorique *6. Formalisation du modèle allostérique.*

7.1.2.1. Structure et organisation du savoir, dimensions péricognitives

Il s'agira ici de rassembler les résultats obtenus autour des connaissances naïves, du recyclage neuronal, de la structuration des premiers apprentissages, des conceptions « clé de voûte », des plis cognitifs et des paradigmes de pensée, mais aussi des structures fines des conceptions. On recherchera en particulier les différentes manières de les exploiter pour penser l'apprendre et construire un ensemble de paramètres susceptibles de faciliter les apprentissages. Parce que ces derniers bénéficieront essentiellement de leur compréhension par l'apprenant lui-même, on y adjoindra la métacognition et les autres dimensions péricognitives.

7.1.2.2. Processus cognitifs de traitement de l'information

On abordera ici l'ensemble des résultats formulés au sujet des sites actifs, des heuristiques et des métaconceptions de contrôle, en insistant sur les processus d'inhibition, sur les questions d'accessibilité des heuristiques, sur les réflexes de pensée et sur les contrôles cinétique et thermodynamique de traitement de l'information. L'introduction de ces diverses notions nouvelles fournira d'inédites et précieuses pistes didactiques pour rendre la pensée plus efficace.

---

[76] A cet égard, la notion d'environnement « didactique » est ambiguë : en tant qu'outil descriptif des liens entre les processus mentaux et les actions pédagogiques à entreprendre pour les exploiter, il s'agit bien d'une carte conceptuelle d'ordre didactique. Mais au niveau du 4e disque concentrique, c'est plutôt un environnement d'ordre pédagogique qui est proposé à l'enseignant.

7.1.2.3. Processus activés de transformation des conceptions

Ce volet sera l'un des plus féconds pour faciliter les apprentissages, tant la description des processus correspondants sous la forme d'étapes élémentaires activées fournit de paramètres divers et exploitables : impulsion, enthalpie et entropie d'activation, gestion de l'état de transition, catalyse, effets tunnel et template… autant d'éléments déjà développés qui seront rassemblés dans un environnement didactique spécifiquement lié au franchissement de la barrière d'activation lors des apprentissages.

7.1.2.4. Stabilité des structures de pensée

Tout aussi important que le précédent, puisqu'il est inutile de changer de conception si la nouvelle ne peut être stabilisée et préservée, cet environnement didactique permettra de faire la synthèse des conditions d'apprentissage liées non plus à l'état de transition, mais aux états initiaux et finaux. On y retrouvera les nombreux paramètres développés dans la sous-partie *6.5. Stabilisation du savoir*, l'ensemble permettant de consolider les apprentissages réalisés.

7.1.2.5. Avertissements

Si ces environnements didactiques doivent permettent de mettre en évidence certains paramètres inédits et originaux, un grand nombre de ceux qui y figurent pourront à l'inverse paraître élémentaires et sembler ne pas apporter beaucoup à notre compréhension des processus d'apprentissage. Il convient de se souvenir que cette partie constitue justement en premier lieu une validation de la théorie développée plus haut, qui passe par l'évaluation de la pertinence des prévisions réalisées. Dans la mesure où tous les paramètres décrits dans les développements ci-dessous découlent directement de la théorie, il sera donc plutôt rassurant d'y retrouver des notions pédagogiques classiques et bien établies.

Par ailleurs, rappelons que nous définissons désormais l'apprendre comme consistant, outre en la création de conceptions nouvelles à partir d'éléments cognitifs de base, en la modification du savoir préexistant, de ses règles d'orientation, de sa souplesse, de ses inhibitions et des stabilités relatives des conceptions qui le constituent. Dans les cartes conceptuelles qui suivent, il ne sera pas toujours possible de mentionner cette diversité, pour des questions pratiques évidentes. Il sera donc nécessaire de la conserver à l'esprit en permanence[77].

ATTENTION : les 4 cartes conceptuelles des pages suivantes sont présentées sous forme de vignettes renvoyant vers des documents lisibles présentés au format A3 dans les pièces annexes de la thèse.

7.2. Description

7.2.1. Environnement 1 : Structure et organisation du savoir, dimensions péricognitives

Cet environnement didactique (figure 76), comme le suivant d'ailleurs, ne concerne pas vraiment les processus d'apprentissage en tant que tels mais plutôt un ensemble de paramètres souvent inconscients qui sous-tendent la pensée. Leur connaissance par l'apprenant fait partie de la bonne gestion de ses apprentissages, pour lesquels ils sont souvent déterminants. Cela rend ce premier environnement didactique essentiellement métacognitif.

Certains de ces paramètres se mettent en place dès le plus jeune âge, spontanément, en l'absence de véritables enseignements ; mais tout au long de la vie, il reste possible d'agir sur eux, seul ou dans le cadre d'un enseignement, ce qui justifie leur traitement dans les trois autres disques concentriques. Notons encore que plusieurs d'entre eux interviendront dans les processus d'apprentissage proprement dits, c'est pourquoi ils se retrouveront dans les environnements didactiques suivants.

[77] Dans le cadre d'un enseignement au *Département d'Etudes Cognitives* de l'Ecole normale supérieure, nous avons pu récolter quelques versions simplifiées d'environnements didactiques reprenant les caractéristiques du modèle allostérique formalisé. Elles sont présentées dans l'annexe *12.1. Autres environnements didactiques*.

Cinq catégories principales ont été distinguées :

1. La première (dans le sens antihoraire) concerne la construction de la structure de la partie « active » du savoir, c'est-à-dire de celle qui permet le traitement de l'information. Des paramètres qui seront également développés dans l'environnement didactique suivant.
2. La seconde concerne quant à elle le socle fondamental des savoirs, ce qui en fait la charpente : conceptions clés de voûte, premiers apprentissages… Les suggestions pédagogiques qui en découlent sont classiques mais néanmoins fondamentales.
3. La troisième porte sur l'exploitation des structures cérébrales primitives et des connaissances naïves. Des dimensions originales, qui ouvrent des pistes intéressantes pour l'enseignant.
4. La quatrième, très métacognitives, concerne la prise de conscience par l'apprenant des structures de son savoir, et notamment de celles qui peuvent rendre ses apprentissages difficiles. Le rôle de l'enseignant, *accompagnateur* et *facilitateur* des apprentissages, est là encore crucial.
5. La cinquième catégorie, enfin, porte sur l'exploitation et la maîtrise des émotions, à un niveau très général. Le rôle joué par les émotions au niveau des apprentissages spécifiques sera abordé dans les autres environnements didactiques.

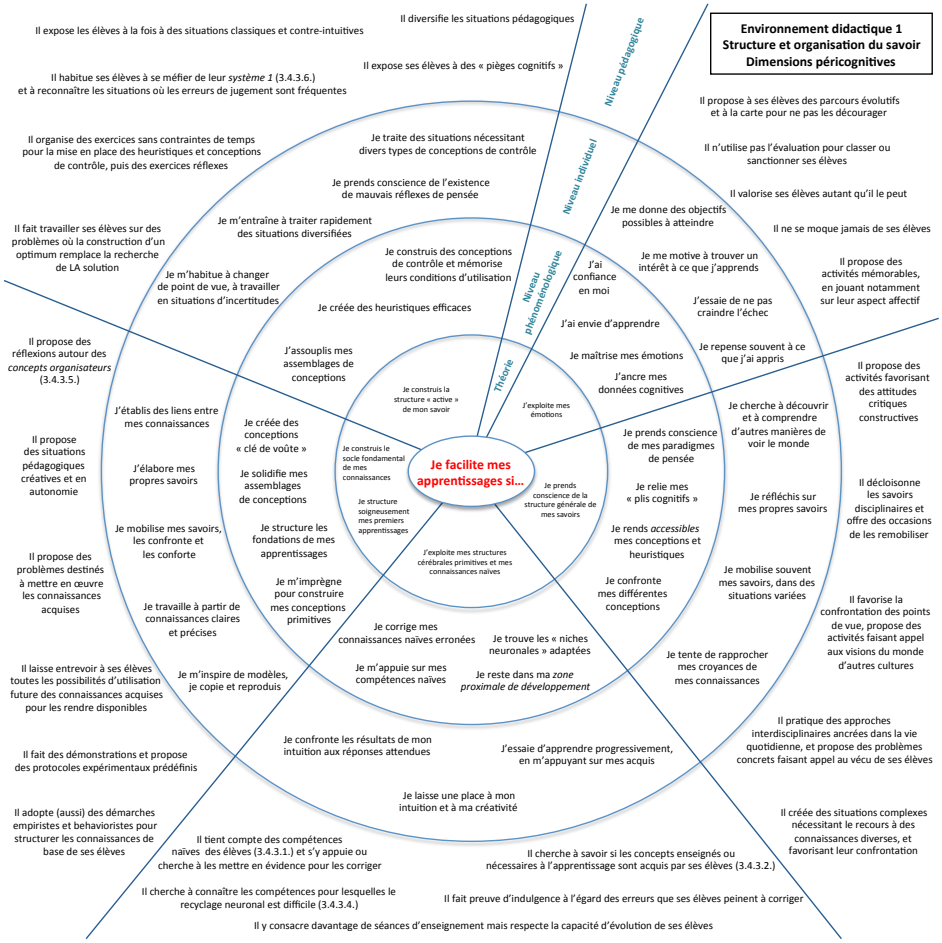


Figure 76 : Représentation du premier environnement didactique déduit de la partie théorique.

7.2.2. Environnement 2 : Processus cognitifs de traitement de l'information

Cet environnement didactique (figure 77) s'appuie sur ce qui fait désormais notre compréhension des processus de traitement de l'information. Il développe les aspects de l'apprentissage relatifs à l'amélioration de l'efficacité de la pensée, rassemblés selon les quatre catégories de la page suivante.

1. Les deux premières (dans le sens antihoraire) sont de l'ordre de l'entrainement des stratégies cognitives. Vis-à-vis de l'enseignant, elles se traduisent par des recommandations communes, d'où l'absence de frontière dans le quatrième disque entre ces deux catégories. La première possède une forte composante métacognitive : en s'appuyant sur l'identification des modes S, R et K par l'apprenant, elle suggère l'adoption de stratégies cognitives respectivement adaptées et donne des pistes pour entraîner cette faculté d'adaptation.
2. La seconde concerne plus directement l'aménagement des heuristiques et conceptions de contrôle en vue de favoriser des réactions plus pertinentes et plus efficaces lors de prises de décision ultérieures face à des informations à traiter. Elle prodigue quelques conseils à l'apprenant et à l'enseignant pour y parvenir.
3. La troisième insiste sur la gestion de la charge cognitive, autant à travers la limitation des informations à traiter simultanément que de la sollicitation des schèmes de pensée adéquats. Les recommandations qui en découlent pour l'enseignant, souvent oubliées dans le processus d'enseignement, méritent que l'on s'y attarde.
4. La quatrième concerne l'adoption d'attitudes performantes en situations d'évaluation, selon qu'elles sont effectuées en temps limité ou non. Elle se traduit par des recommandations pour l'enseignant, non seulement en termes d'entraînement de ses élèves avant l'évaluation, mais aussi et surtout en termes de choix des modes d'évaluations en fonction des capacités de ses élèves.

Figure 77 : Représentation du deuxième environnement didactique déduit de la partie théorique.

Note spécifique (1) : Cela ne dispense pas, bien sûr, de contextualiser les apprentissages au moment de l'introduction des sujets enseignés. Il s'agit ici seulement de simplifier les problèmes pour acquérir les bonnes stratégies, de manière à pouvoir ensuite les transposer à des problèmes plus complexes.

7.2.3. Environnement 3 : Processus activés de transformation des conceptions

En exploitant la compréhension allostérique des processus d'apprentissage lorsqu'ils nécessitent le franchissement d'une barrière d'activation, cet environnement didactique (figure 78) constitue véritablement le cœur des applications pédagogiques qu'il est possible de déduire de la théorisation du modèle initial.

Sa force repose dans la formalisation unique et commune d'un large ensemble de transformations du savoir, à travers l'idée de *processus activé* dont il exploite les caractéristiques génériques pour conduire à une multitude d'applications pédagogiques. Comme nous l'avons exposé dans la section *6.4.2. Des processus élémentaires « activés »*, cette généralisation permet de dépasser largement le cas simple de la transformation d'une conception et de son passage entre un état 1 et un état 2, comme le décrivait le modèle empirique de 2002.

Ce troisième environnement didactique s'appuie essentiellement sur la représentation des surfaces d'énergies potentielles représentatives de la fonction d'apprentissage θ, et sur leurs coupes verticales introduites dans la section *6.4.3. Fonctions d'optimisation et d'apprentissage*. Bien entendu, il tire parti de l'introduction des grandeurs thermodynamiques introduites plus haut, et notamment des idées d'enthalpie et d'entropie d'apprentissage.

Il se décompose dès lors en cinq catégories principales :

1. Une première manière de faciliter le passage d'un état 1 à un état 2 (élaboration, enrichissement ou transformation de conceptions ou de métaconceptions, élargissement, inhibition ou désinhibition d'heuristiques, création de règles d'orientation, établissement ou destruction de liens entre conceptions, etc.) consiste à élever l'énergie potentielle de l'état 1 de manière à réduire la hauteur de la barrière d'activation. Le processus a été bien décrit en termes de « conflit cognitif » ou « socio-cognitif » et les procédés pédagogiques pour y parvenir sont nombreux. La description allostérique du savoir permet toutefois d'ajouter plusieurs pistes intéressantes.
2. Réciproquement, il doit être possible d'agir directement sur l'énergie de l'état de transition (noté ET dans le schéma) pour amoindrir la barrière d'activation. Cette stabilisation peut être, comme dans le processus précédent, d'origine intérieure (individuelle) ou extérieure (facilitée par l'enseignant). Elle semble en outre très sensible au recul que l'apprenant peut avoir sur l'apprentissage en cours.
3. La troisième catégorie porte non pas sur l'enthalpie de la transformation, mais sur son entropie, c'est-à-dire essentiellement sur la largeur du col à l'état de transition, car c'est là que la vallée est a priori la plus contrainte. Il n'est toutefois pas exclu de tenter de rigidifier l'état initial pour accroître l'entropie d'activation et faciliter le passage de l'état de transition. Cet aspect totalement inédit en sciences de l'éducation ouvre des voies pédagogiques particulièrement intéressantes, bien que délicates à mettre en œuvre.
4. Une conséquence originale de la visualisation de la fonction d'apprentissage consiste ensuite à se demander s'il serait possible de « traverser » la barrière d'activation plutôt que de la surmonter. C'est l'effet tunnel, décrit à la section *6.6.3. Un « effet tunnel » cognitif*, qui fournit quelques pistes inédites.
5. Enfin, il ne suffit pas d'abaisser la hauteur de la barrière d'activation et/ou de faciliter le passage du col à l'état de transition ; il reste en effet encore à avoir suffisamment « d'impulsion » pour être en mesure de passer de l'état 1 à l'état 2, mais également à savoir prendre la bonne « trajectoire » d'apprentissage. C'est ce que décrit la cinquième catégorie, dont les pistes pédagogiques s'avèrent nombreuses.

Figure 78 : Représentation du troisième environnement didactique déduit de la partie théorique.

7.2.4. Environnement 4 : Stabilité des structures de pensée

L'étude des paramètres régissant la stabilité des structures de pensée fournit enfin un quatrième jeu de recommandations, d'autant plus importantes qu'un apprentissage ne sera effectif que lorsque les conceptions nouvellement élaborées subsisteront durablement dans l'esprit de l'apprenant.

Ce quatrième environnement didactique (figure 79) se construit de la même manière que le précédent, en observant cette fois non plus l'état de transition, mais les états de savoir correspondant aux vallées initiales et finales lors du processus d'apprentissage. Il se décompose lui-même en six catégories distinctes :

1. Très naturellement, un savoir sera d'autant mieux acquis que l'énergie potentielle de l'état final sera plus basse ; stabilité intrinsèque du schème en question, mais également stabilité globale dudit schème dans son nouvel écosystème, c'est-à-dire en interaction avec les autres schèmes de l'apprenant (nouveaux ou anciens).
2. Outre la stabilité structurelle des schèmes, il est possible d'agir sur leur stabilité affective, de manière à accroître la confiance conjoncturelle que leur porte l'apprenant. Un processus qu'il est possible de réaliser de diverses manières.
3. A l'inverse, il est possible d'agir sur les mêmes leviers au niveau des schèmes initiaux, mais en les déstabilisant, structurellement ou conjoncturellement. Le procédé est le même, mais il doit au contraire réduire la confiance de l'apprenant en son schème à modifier.
4. Au-delà des aspects enthalpiques, l'action sur l'entropie des schèmes de pensée peut être également envisagée. Ainsi une vallée d'enthalpie libre trop étroite ne sera pas propice à la stabilité des conceptions et il ne sera jamais opportun de s'y laisser enfermer.

5. Cette dimension entropique pourra par ailleurs être utilisée soit pour stabiliser les savoirs nouveaux, soit pour déstabiliser les anciens. Mais de manière générale, un savoir souple sera toujours préférable à un savoir trop rigide, pour autant qu'il soit construit de manière cohérente et un tant soit peu résistante.
6. Enfin, on pourra envisager le même type d'actions sur les conceptions de contrôle : des métaconceptions stables, si elles sont opératoires, faciliteront l'accessibilité aux conceptions pertinentes et permettront de perfectionner les stratégies cognitives adaptées.

Figure 79 : Représentation du quatrième environnement didactique déduit de la partie théorique.

Note spécifique (1) : Augmenter l'entropie d'un savoir le stabilise, tout comme le consolider avec des liens internes et externes forts (en diminuant son enthalpie). L'action simultanée sur ces deux paramètres permet de préserver la capacité ultérieure à apprendre, à condition de pouvoir le cas échéant réaugmenter l'enthalpie de la conception à modifier. La souplesse du savoir ne sera alors pas un handicap car, bien qu'elle stabilise le savoir, elle facilite également l'accès à l'état de transition, surtout si la conception ultime est enthalpiquement plus stable que celle dont part l'apprenant (en vertu du postulat de Hammond, évoqué à la section 6.6.3. Un « effet tunnel » cognitif*).*

7.3. Lecture et utilisation pratique des environnements didactiques

Ces cartes conceptuelles ne sont bien évidemment pas utilisables telles quelles par un enseignant qui souhaiterait préparer un cours ou par un étudiant qui voudrait apprendre à enseigner. Il convient donc de les utiliser comme des outils qui, selon les circonstances, peuvent guider la pratique et la réflexion.

7.3.1. Lecture globale

Le premier niveau de lecture est celui de la distinction entre les quatre environnements didactiques. Ils permettent de prendre conscience de l'existence, à chacun de leurs niveaux respectifs, de leviers fondamentaux de l'apprentissage, déclinables en de multiples actions pédagogiques.

Cette lecture globale peut être précisée par la prise en compte du niveau plus fin que constituent les grandes catégories radiales qui y sont décrites, ce qui nécessite toutefois de connaître les détails de la théorie, et notamment les fonctions d'apprentissage. Un prérequis qu'on ne pourra pas attendre de la part des enseignants ou des étudiants ; c'est pourquoi les lectures radiales et circulaires lui seront préférables.

7.3.2. Lecture radiale

La lecture radiale consiste à n'étudier à la fois qu'un seul secteur d'un environnement didactique donné, choisi sur la base d'une préoccupation particulière, ou d'un mot ayant attiré l'attention. Dans ce cas, cette dernière devrait selon nous se focaliser sur les deux niveaux intermédiaires : le premier n'est en effet que théorique et n'est présent que pour signifier l'origine des idées développées ensuite ; le dernier, comme nous l'avons expliqué plus haut, fournit des propositions pédagogiques qui doivent avant tout être considérées comme des exemples, illustrant les préconisations des niveaux inférieurs et incitant à en développer d'autres pour atteindre les objectifs d'apprentissage individuel correspondants.

7.3.3. Lecture circulaire

Intermédiaire entre la lecture globale et la lecture radiale, la lecture circulaire d'un niveau donné, dans l'un quelconque des 4 environnements didactiques, permet de se construire une vision générale de l'ensemble des paramètres importants. Ainsi, la lecture circulaire du dernier niveau du quatrième environnement didactique fournira par exemple un large aperçu des moyens d'actions possibles sur la stabilité des structures de pensée des apprenants. De même, celle du deuxième niveau du troisième schéma permettra de prendre conscience des leviers théoriques sur lesquels appuyer la transformation des conceptions.

7.3.4. Utilisation analytique

Au-delà de la lecture de ces environnements didactiques, il est possible de les employer pour analyser l'efficacité potentielle d'une séquence pédagogique donnée. Considérant un outil, une ressource, une pratique, une démarche particulière, il est intéressant de survoler l'ensemble des 4 cartes conceptuelles en s'interrogeant sur les niveaux susceptibles d'être concernés. Ce faisant, c'est non seulement l'efficacité de la séquence qui est éclairée, mais également les risques qu'elle présente, voire ses conditions optimales d'utilisation ; une démarche que nous emploierons plus loin, dans notre partie expérimentale, avec le cas de l'expérience contre-intuitive.

7.3.5. Utilisation incitative

Une autre utilisation possible consiste à s'imprégner des différentes propositions de ces environnements didactiques, pour en acquérir non seulement une vision d'ensemble, mais également un état d'esprit général, qui est celui des enseignants formés par les approches pédagogiques de type allostérique. Plus que des méthodes précises, la description allostérique de l'apprendre guide imperceptiblement l'enseignant vers des modes moins frontaux, plus participatifs, tenant mieux compte des préconceptions des élèves et des modalités de leur évolution ou de leur stabilisation. Ces cartes conceptuelles, comme la description de la théorie, peuvent y aider.

7.3.6. Utilisation formative

Dans la formation des enseignants, on pourra imaginer d'autres utilisations possibles de ces environnements didactiques. Après un bref exposé de la théorie, on pourra par exemple les leur fournir sous une forme incomplète, les troisième et/ou quatrième niveaux étant manquants, en leur demandant de les compléter. On pourra également leur proposer des démarches analytiques telles que décrites au paragraphe précédent, pour évaluer un outil pédagogique donné.

La sous-partie *9.1. Conseils aux enseignants pour une approche pédagogique « allostérique »* fournit des pistes complémentaires directement applicables par les enseignants.

7.4. Comparaisons avec l'environnement didactique de 2002

Il convient à présent de considérer les différents paramètres de l'environnement didactique de 2002, décrit à la section *3.3.4. L'environnement didactique*, et de tenter de les retrouver dans les cartes conceptuelles décrites ci-dessus. Par commodité, on les nommera respectivement ED1, ED2, ED3 et ED4.

7.4.1. Trouver du sens aux savoirs abordés, être motivé

On retrouve ces paramètres (et leurs conséquences pédagogiques pour l'enseignant) dans l'ED1 où le sens conféré aux savoirs abordés et à l'apprentissage joue un rôle émotionnel fort. Dans l'ED3, le premier des deux sert directement le second (la motivation), qui facilite le franchissement de la barrière d'activation. On le retrouve également dans l'ED2, qui rappelle qu'il est préférable d'être « en terrain connu » pour mieux accepter la déstabilisation de ses conceptions lors du processus de transformation. La contextualisation de l'enseignement permet également, dans l'ED4, de stabiliser les nouvelles conceptions acquises.

7.4.2. Se confronter - être perturbé, déstabilisé, confronté à d'autres réalités

Ce jeu de paramètres apparaît particulièrement dans l'ED3, puisqu'il permet de déstabiliser les schèmes de pensée initiaux, ce qui contribue non seulement à abaisser la barrière d'activation du processus d'apprentissage, mais également à stabiliser de manière relative la nouvelle conception (ED4). Les dissonances cognitives permettent également d'éprouver ses heuristiques et d'entraîner ses réflexes de pensée, procédés décrits cette fois dans l'ED2. Dans l'ED1, on note qu'elles permettent de prendre conscience de la structure de ses propres savoirs. On remarquera qu'à chaque fois, les nouveaux environnements didactiques sont beaucoup plus exhaustifs que celui de 2002 quant au détail et aux applications des paramètres évoqués.

7.4.3. Avoir confiance, oser se « lâcher », être accompagné

L'idée de confiance (en soi, en son savoir, en l'enseignant, en le regard des autres, en la situation pédagogique, en la pertinence du processus d'apprentissage engagé…) apparaît dans tous les nouveaux environnements didactiques : rapport à l'échec (ED1), gestion du stress (ED2), hauteur de la barrière d'activation et facilité du passage de l'état de transition, mais aussi motivation (ED3) et stabilisation des conceptions (ED4). On la retrouve donc bien plus largement que dans l'environnement didactique de 2002, et notamment sous de multiples formes qu'il est intéressant d'apprendre à distinguer tant elles agissent sur des paramètres d'apprentissage différents.

7.4.4. Savoir imaginer, oser innover

Ce paramètre, qui semble inclure la capacité à s'exprimer et à prendre du recul sur ses apprentissages, intervient dans l'ED1 au niveau de l'exploitation de ses connaissances naïves par l'apprenant, dans

l'ED2 lors de l'exploration de diverses heuristiques pour lui permettre de déterminer les bonnes stratégies cognitives, dans l'ED3 au niveau de l'assouplissement de l'état de transition et du choix ultérieur des bonnes voies cognitives, mais également de l'effet tunnel où la créativité et l'innovation permettent de mieux anticiper les conceptions nouvelles.

7.4.5. Pouvoir mobiliser ses savoirs, les articuler autour de concepts organisateurs

La mobilisation des savoirs intervient dans l'ED1, au moment de la construction du socle fondamental des connaissances, de l'élaboration des conceptions « clé de voûte » et de la structuration générale des savoirs. La gestion des concepts organisateurs y apparaît en bonne place. Elle y apparaît également au niveau de la réflexion sur ses propres savoirs et de la prise de conscience de leur structure. Dans l'ED2, la mobilisation des savoirs est inhérente aux modes de pensée R et K, alors qu'elle doit être entraînée pour permettre le traitement de certaines tâches en mode S. Elle permet également les dissonances cognitives internes susceptibles de déstabiliser une conception initiale, voire de motiver à en changer (ED3), ou la stabilisation de conceptions nouvelles par leur mise en cohérence avec les conceptions préexistantes (ED4).

7.4.6. Elaborer, réfléchir sur ses propres savoirs

Cette dimension autonomisante et métacognitive apparaît déjà au niveau des paramètres précédents. L'élaboration de ses propres savoirs permet de les stabiliser en les personnalisant (ED4). La métaréflexion permet de prendre conscience de la structure de ses savoirs (ED1), d'entraîner et d'inhiber ses heuristiques et métaconceptions (ED2). Elle permet également de stabiliser des conceptions nouvelles en créant des liens, d'accompagner le passage de l'état de transition lors d'un processus d'apprentissage, d'assouplir son savoir et de prendre du recul sur les voies à suivre et les stratégie cognitives à emprunter (ED3).

7.4.7. S'approprier des aides à penser

On retrouve cette notion dans les métaconceptions de contrôle (reconnaissance et orientation) qui accompagnent tous les processus cognitifs. Les « aides à penser » permettent de stabiliser des conceptions nouvelles (ED4), de structurer des savoirs (ED1), d'orienter la pensée vers les bonnes heuristiques (ED2) et, dans le cadre un peu particulier de ce que nous avons nommé « effet template », de stabiliser l'état de transition et d'orienter l'apprentissage vers les bons processus (ED3). La diversification des outils didactiques est également suggérée dans l'ED1 et l'ED4.

Voyons à présent comment ces environnements didactiques peuvent être utilisés pour prévoir les caractéristiques d'un outil pédagogique donné, en termes d'intérêts mais également de limites.

7.5. Applications à l'expérience contre-intuitive

La théorie allostérique a permis de formuler quatre environnements didactiques relatifs à quatre volets de description du savoir, de ses transformations et des processus de pensée. Si cette théorie est exacte et que ses applications pédagogiques en ont été déduites de manière pertinente, alors l'ensemble des conditions dans lesquelles une expérience contre-intuitive peut être employée efficacement (et ce, sur la seule base de sa définition) doit pouvoir être non seulement prévu, mais apparaître avec un minimum de pertinence pédagogique et de cohérence avec la pratique de l'enseignement expérimental. C'est ce que nous nous proposons de vérifier dans un premier temps, à la fois de manière à montrer la fécondité pédagogique des environnements didactiques et de manière à fournir des hypothèses pour la recherche expérimentale.

7.5.1. Structure et organisation du savoir, dimensions péricognitives

D'après ce premier environnement didactique, l'expérience contre-intuitive devrait permettre de construire des conceptions de contrôle par la prise de conscience de mauvais réflexes de pensée, tout en créant de bonnes conditions de mémorisation (ces expériences étant souvent spectaculaires) grâce à des effets émotionnels forts. Peu propice au renforcement du socle fondamental des connaissances et à l'élaboration de conceptions clés de voûte, dans la mesure où elle vient au contraire perturber les connaissances en place, elle peut en revanche permettre de visiter les connaissances naïves de l'apprenant, voire de lui permettre d'explorer de nouvelles niches neuronales en l'obligeant à faire preuve de créativité.

Enfin, parce qu'elle oblige à abandonner des conceptions erronées et à trouver d'autres voies interprétatives des phénomènes observés, elle doit pouvoir permettre de mettre en présence des conceptions issues de plis cognitifs initialement disjoints, voire de remettre en question de véritables paradigmes de pensée.

7.5.2. Processus cognitifs de traitement de l'information

Ce second environnement didactique met en évidence l'intérêt que peut présenter l'expérience contre-intuitive au regard de l'entraînement des heuristiques et de leur inhibition éventuelle. En mode S, comme cela a été évoqué plus haut, elle permet d'identifier les mauvais réflexes de pensée. Dans la plupart des cas, une heuristique erronée donne rapidement un résultat dont la personne qui l'a formulé se rend vite compte de l'absurdité ; le mauvais réflexe de pensée n'est donc pas facile à détecter par l'enseignant. En revanche, pour l'expérience contre-intuitive, dans la mesure où le résultat est perturbant et ne peut être raccroché à rien de connu, on peut imaginer qu'il arrive plus souvent que la conception fausse soit stabilisée temporairement par l'information reçue, laissant le temps à l'enseignant de la détecter (ce que nous confirmerons d'ailleurs dans la recherche expérimentale de la partie suivante).

Elle oblige surtout à passer en modes R ou K une fois le résultat observé, à mobiliser ses savoirs, à créer des liens… Une fois les mauvaises heuristiques détectées, elle oblige à créer des conceptions de contrôle qui permettront d'éviter de refaire les mêmes erreurs, voire à les inhiber définitivement. Elle apprend notamment à se méfier des effets de confiance : la découverte d'un phénomène contre-intuitif est souvent perturbante car elle remet en question des connaissances que l'on croyait fiables ; à cet égard, elle conduit à une certaine prudence.

Au regard de l'évaluation, cet environnement didactique suggère également à l'enseignant de ne pas mettre ses élèves dans des situations qui les amèneraient à traiter des expériences contre-intuitives en mode S (ce qui constituerait un piège caractérisé). Bien au contraire, il préférera les employer sous contrôle thermodynamique pour permettre d'en exploiter toutes les potentialités pédagogiques.

7.5.3. Processus activés de transformation des conceptions

C'est bien sûr au niveau de la phase d'activation que l'expérience contre-intuitive prend tout son sens. Selon ce troisième environnement didactique, elle permet en premier lieu d'augmenter l'énergie potentielle des conceptions, heuristiques et métaconceptions initiales à modifier en montrant à l'apprenant qu'elles sont inopérantes dans la situation qu'elle illustre. Bien souvent, il s'agira d'une destruction pure et simple, obligeant à réorganiser totalement son savoir. Il n'est donc pas pour autant garanti que l'énergie potentielle de l'état de transition soit abaissée ; au contraire, si l'expérience contre-intuitive déstabilise trop l'apprenant, elle risque de remettre en question des conceptions qui n'ont pas lieu de l'être, conduisant à une déstabilisation exagérée et un état de transition très élevé. Le rôle de l'enseignant consistera alors à aider son élève à sérier les informations à traiter, à décomposer le processus en étapes successives pour bénéficier de l'effet catalyse, à étayer l'état de transition par des métaconceptions nouvelles.

En termes entropiques en revanche, on peut s'attendre à ce que l'expérience contre-intuitive assouplisse très largement le savoir, dès lors que l'apprenant aura accepté son résultat et lâché prise ; dans le cas contraire, il est prévisible qu'elle puisse conduire à des blocages qui rigidifient le savoir à tel point que le résultat de l'expérience soit rejeté, voire nié.

Cet environnement suggère en outre que l'effet tunnel sera quant à lui peu exploitable, dans la mesure où il nécessite de visualiser le résultat attendu ; un effet peu probable dans une situation qui oblige à remettre en question un système explicatif que l'on croyait fiable, à moins d'un très fort accompagnement par l'enseignant. Un accompagnement dont on peut prévoir, à la lumière de cet environnement didactique, qu'il soit nécessaire pour diriger l'apprenant vers la bonne vallée d'énergie potentielle une fois que ses conceptions initiales auront été détruites ; un paramètre sur lequel nous reviendrons un peu plus loin.

En termes de « température » et d'impulsion à apprendre, enfin, l'expérience contre-intuitive semble constituer un outil particulièrement motivant, dans la mesure où la découverte d'un phénomène spectaculaire est propre à donner l'envie d'en savoir plus, comme face à un tour de prestidigitation, et d'autant plus si l'apprenant pense pouvoir le réaliser à nouveau pour lui ou pour ses proches.

7.5.4. Stabilité des structures de pensée

En termes de stabilisation des conceptions, on ne peut probablement pas attendre beaucoup de l'expérience contre-intuitive, si ce n'est en procurant une stabilisation relative à certaines conceptions en en déstabilisant d'autres. En stimulant l'apprentissage et l'envie de comprendre, elle peut toutefois peut-être motiver l'apprenant à prendre en main son évolution, à s'approprier son savoir et ses nouvelles conceptions ce qui, selon cet environnement didactique, constitue un paramètre de stabilité. En amenant celui qui y assiste à prendre du recul sur son savoir, à préciser des choses qu'il croyait connaître, elle peut en outre avoir un rôle sur l'entropie de ses conceptions en les assouplissant ; pour autant, comme nous l'avons vu plus haut, qu'il ait confiance en sa capacité à dépasser ce type d'obstacle, qu'il lâche prise et ne se recroqueville pas sur un savoir figé. Les aspects émotionnels et l'accompagnement prodigué par l'enseignant sont, à cet égard, probablement déterminants.

Ainsi, si les environnements didactiques développés précédemment sont corrects, l'expérience contre-intuitive est susceptible de constituer un bon outil pédagogique au-delà des raisons évidentes pour lesquelles elle est en général sollicitée.

7.6. Corroboration de l'hypothèse de recherche *H2*

La sous-partie *7.4. Comparaisons avec l'environnement didactique de 2002* a permis de montrer que tous les paramètres de ce dernier se retrouvent dans les nouveaux environnements didactiques déduits de la formalisation du modèle, même si leur organisation est différente. A cet égard, un objectif important fixé par la recherche est atteint : il est en effet possible de déduire l'environnement didactique de 2002 du modèle allostérique formalisé. Objectif d'autant plus important pour nous que ce qui nous avait gêné lors de la découverte de cet environnement didactique en 2002 était justement son apparente déconnexion avec le modèle associé.

Il est en outre possible d'en déduire davantage encore : des idées simples et évidentes d'une part, qui, comme nous l'avons évoqué plus haut, confortent la pertinence de la théorie en la rendant opératoire. Des idées plus ambitieuses d'autre part, qui lui assurent sa fécondité mais qu'il faudra valider d'une autre manière (ce qui fera l'objet de la partie suivante).

Par ailleurs, en explorant simplement les quatre environnements didactiques élaborés à partir du modèle allostérique formalisé, et en les interrogeant sur les intérêts et limites d'un concept aussi simple que l'expérience contre-intuitive, sur la seule base de sa définition, nous avons montré dans la

sous-partie *7.5. Applications à l'expérience contre-intuitive* qu'il était possible d'élaborer une série d'éléments susceptibles de guider son utilisation.

Si cette constatation est insuffisante pour constituer la preuve de la pertinence de la théorie et de ses applications directes, elle permet néanmoins de vérifier qu'elle ne conduit pas à des préconisations pauvres ou absurdes d'un élémentaire point de vue pédagogique. Cette première application des environnements didactiques présente donc un intérêt majeur pour notre recherche, au sens ou la pertinence de ces prévisions constitue une première validation des environnements didactiques, et donc du modèle qui a permis de les élaborer.

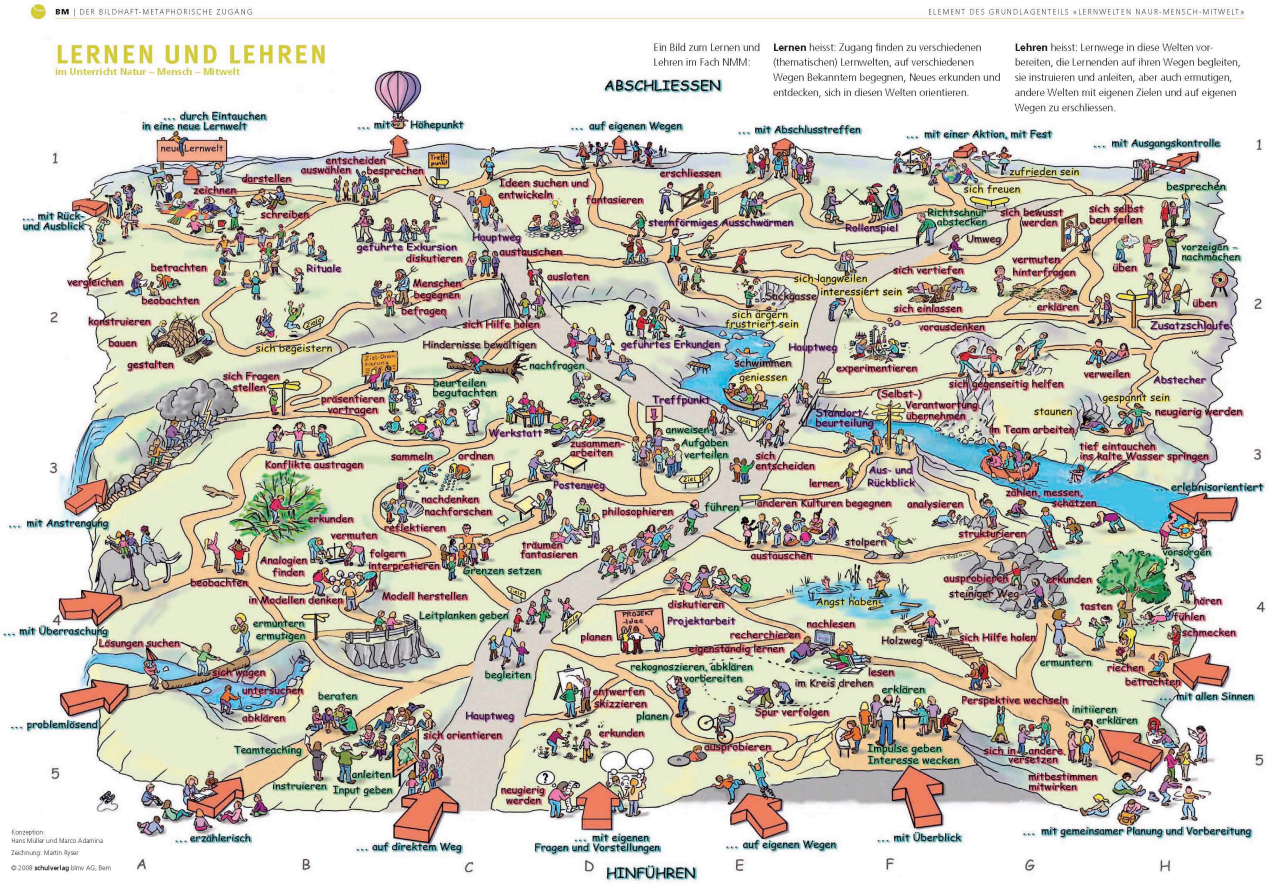


Figure 80 : Autre exemple de conceptogramme décrivant les chemins praticables à travers les paysages de l'apprendre[78].

78 Conception : Hans Müller et Marco Adamina. Dessin : Martin Ryser © 2008 schulverlag blmv AG, Bern. Disponible à la commande en français sur http://f.schulverlag.ch - Dernière consultation le 05/02/2013.

Dès lors, il semble légitime de considérer notre deuxième hypothèse de recherche comme étant corroborée, au sens où la formalisation du modèle allostérique a effectivement permis l'élaboration d'environnements didactiques pertinents et compatibles avec les connaissances pédagogiques validées, tout en proposant plusieurs nouvelles pistes à explorer. C'est toutefois la partie suivante, fondée sur une approche falsificationniste du modèle, qui permettra d'en éprouver en détail la pertinence et les limites.

8. PARTIE EXPERIMENTALE : MISE A L'EPREUVE DU MODELE ALLOSTERIQUE FORMALISE (H3)

« Chercher à connaître n'est souvent qu'apprendre à douter »
Antoinette Des Houlières (1634-1694), femme de lettres française.

L'objectif de cette partie consiste à corroborer notre troisième hypothèse de recherche.

Hypothèse 3 :	*Le modèle allostérique de l'apprendre formalisé peut être éprouvé expérimentalement dans une démarche falsificationniste à partir d'une prédiction théorique originale du modèle, choisie pour sa facilité de mise en œuvre expérimentale et pour la richesse des observations pédagogiques qu'elle permet de réaliser.*

Le choix de l'expérience contre-intuitive comme outil de mise à l'épreuve du modèle allostérique a été justifie à la section *4.3.4. Validation expérimentale du modèle* : ce type d'approche semble en effet utile non seulement pour motiver les apprenants et bousculer les conceptions (ce qui explique leur large usage en vulgarisation scientifique), mais également pour le chercheur en sciences de l'éducation qui, par ce biais, bénéficie d'un accès facilité aux conceptions, heuristiques et modes de pensée de ses sujets. Il s'agit donc d'un outil aussi bien didactique (au sens de l'activité de recherche à visées pédagogiques) que pédagogique (au sens de l'outil utile pour l'enseignant). Ce choix a par ailleurs été confirmé par son intérêt pédagogique déduit des environnements didactiques développés précédemment, dans la sous-partie *7.5. Applications à l'expérience contre-intuitive*.

La sous-partie *8.1. L'expérience contre-intuitive à travers la théorie allostérique – Prévisions théoriques*, ci-dessous, complète cette dernière analyse en explorant l'ensemble des aspects théoriques et formels du modèle susceptibles de fournir des prédictions intéressantes en termes d'usage et d'effets de l'expérience contre-intuitive, et non plus seulement en l'analysant à l'aune des prédictions des environnements didactiques, qui constituaient déjà eux-mêmes des applications du modèle. Ce sont d'ailleurs les prédictions directement issues de l'approche théorique qui ont servi à construire le protocole expérimental à la partie *5. Méthodologie*.

Les résultats de la recherche expérimentale, dont la méthodologie est décrite dans la sous-partie *5.4. Validation expérimentale (hypothèse 3)*, sont exposés dans la sous-partie *8.2. Résultats*. Ils permettent de vérifier l'ensemble de ces prédictions et, partant, de valider le modèle théorique, ce qui est réalisé dans la sous-partie finale *8.3. Synthèse et validation de l'hypothèse de recherche H3.*

8.1. L'expérience contre-intuitive à travers la théorie allostérique – Prévisions théoriques

En reprenant pas à pas la description de la théorie allostérique, formalisée sur la base de la théorie de la réactivité chimique, il est possible de prévoir un certain nombre de caractéristiques relatives à la nature et/ou à l'utilisation de l'expérience contre-intuitive, en amont de celles qui ont été mentionnées dans la sous-partie *7.5. Applications à l'expérience contre-intuitive*.

En d'autres termes, un peu à la manière des modèles numériques que l'on fait tourner informatiquement en y introduisant des conditions initiales particulières et en regardant ensuite le système évoluer, il s'agit d'introduire l'idée d'*expérience contre-intuitive* à l'entrée du modèle allostérique formalisé et d'observer ce qu'il est en mesure de prévoir à leur sujet.

8.1.1. Structure du savoir et traitement de l'information

8.1.1.1. Socle du savoir, conceptions clés de voûte et connaissances naïves

L'analogie allostérique mentionne des cas dans lesquels il est difficile de susciter un apprentissage ; il s'agit notamment des cas où des connaissances naïves ou des conceptions clés de voûte doivent être modifiées, des plis cognitifs disjoints rapprochés, voire des paradigmes de pensée remis en question. Dans ces cas-là, on peut imaginer que l'expérience contre-intuitive, de par sa nature, constitue l'un des outils les plus efficaces pour perturber les connaissances initiales, offrant autant de potentialités à l'enseignant pour les remplacer qu'au chercheur pour les identifier.

8.1.1.2. Préexistence des sous-unités d'information cérébrale et cadre de référence

Par ailleurs, l'existence d'un « stock de pièces détachées cognitives », suggéré dans la section *6.2.3. Préexistence des sous-unités d'information cérébrale*, permet d'imaginer qu'en toute situation contre-intuitive, l'apprenant soit susceptible de solliciter un schème de pensée préexistant ou d'en élaborer un *ad hoc*, dans l'un ou l'autre des trois cas du modèle-cadre SRK. Cela suppose en premier lieu qu'il ait reconnu et compris les conditions et la nature de l'expérience. Cela suppose également qu'il puisse s'être fait une idée de la tâche cognitive à réaliser pour en traiter le résultat, qui soit suffisamment précise pour que ses métaconceptions orientent sa pensée dans la bonne direction. Autrement dit, il est nécessaire que l'expérience contre-intuitive soit adaptée au cadre de référence de l'apprenant, ou au moins que le contexte lui permette de situer l'opération mentale qu'il devra réaliser pour traiter convenablement l'information perturbatrice.

8.1.1.3. Emergence de la contre-intuitivité : sites actifs, heuristiques et métaconceptions

Si une information s'avère contre-intuitive, cela signifie que l'heuristique qui a pris en charge le questionnement initial l'a dirigé vers un site actif inopérant, soit parce que les conceptions de contrôle l'ont mal identifié et orienté vers la mauvaise heuristique, soit parce que le site actif fonctionne mal. En conséquence, on peut prédire que :

1. la contre-intuitivité n'est pas absolue et qu'une même expérience pourra être contre-intuitive à un certain niveau de connaissances, et non contre-intuitive à un autre :
   - Telle expérience le sera pour un enfant qui n'aura pas encore construit les connaissances nécessaires à son interprétation, mais pas pour l'adulte ou le scientifique pour qui elles constitueront des évidences (parce qu'il aura eu l'occasion d'en observer maintes manifestations ou parce qu'il l'aura formalisé scientifiquement).
   - Mais on peut également imaginer le contraire : tel enfant ne sera pas étonné par une expérience donnée car il n'aura pas encore assisté à suffisamment d'occurrence du phénomène contraire qui induit les adultes en erreur, c'est-à-dire pas encore construit les biais cognitifs ou le cadre d'interprétation rendant contre-intuitif le phénomène, alors que l'adulte, voire le scientifique, sera très perturbé par son observation.

2. la contre-intuitivité est susceptible d'émerger dans deux situations différentes :
   - Dans le premier cas, l'expérience est contre-intuitive par hasard pour un individu donné. Elle ne peut être qualifiée génériquement de « contre-intuitive » et pas employée comme outil pédagogique, même si le fait de relever un cas de contre-intuitivité devrait permettre à un enseignant de l'exploiter comme tel.
   - Dans le second cas, l'expérience est contre-intuitive pour une majorité de personnes (ayant un niveau donné de connaissances sur le sujet), soit parce que l'information est mal reconnue, soit

parce que leurs connaissances sont en général et notoirement mal construites (parce que fondées sur le sens commun, par exemple). Il s'agit des cas où il est possible d'imaginer une expérience qui pourra être qualifiée a priori de contre-intuitive, et cela suppose que ces biais de raisonnements courants soient connus de l'enseignant, du vulgarisateur ou du chercheur. Ce faisant, il a la possibilité d'accentuer l'effet de la contre-intuitivité en aménageant un contexte tel que ce biais soit immanquablement mis en œuvre au moment du traitement cognitif de l'expérience. Pour ce faire, il pourra par exemple exploiter les effets heuristiques décrits dans le paragraphe *6.3.4.1. La prééminence d'heuristiques particulières* : effets de contexte, de rémanence, affectifs, etc. On peut ainsi prévoir des effets de mise en scène forts sur le degré de contre-intuitivité des expériences.

8.1.1.4. Modes S-R-K, contrôles cinétique et thermodynamique

Des deux situations différentes évoquées ci-dessus découlent deux manières d'exploiter la contre-intuitivité d'une expérience : en modes S et R, on agira essentiellement sur les biais cognitifs liés aux métaconceptions et aux heuristiques. En modes R et K, en revanche, on traitera davantage les problèmes liés aux sites actifs et aux connexions entre conceptions. Ces modes étant propres à chaque apprenant, une manière d'influencer ces processus sera d'agir sur le temps de réflexion et le stress auquel est soumis le sujet : c'est sous contrôle cinétique que les effets de contexte devraient être les plus forts, alors que le contrôle thermodynamique devrait conduire à des effets contre-intuitifs moins marqués mais des perturbations plus profondes, lorsqu'elles ont lieu.

8.1.1.5. Stratégies cognitives et anticipation du résultat

Nous avons vu qu'une manière d'accroître la contre-intuitivité d'une expérience pouvait consister à préparer l'esprit par des effets de contexte, de manière à ce que l'information perturbatrice soit guidée plus sûrement au « mauvais endroit » (à savoir vers les conceptions que l'expérience contre-intuitive a pour but de faire remettre en question par l'apprenant). Mais à cet égard, une piste plus intéressante encore semble s'offrir à l'expérimentateur : plutôt que de faire interpréter au sujet le résultat d'une expérience réalisée devant lui, pourquoi ne pas se situer en amont de ce résultat et lui demander d'anticiper ce qu'il sera ? Ce faisant, l'apprenant ne tente plus d'interpréter localement une observation ponctuelle : il met en œuvre un véritable modèle mental destiné à reproduire *a priori* la réalité de la nature à partir des seules conditions initiales. Qu'il se trouve en mode S, R ou K, il doit mettre en branle ses conceptions de contrôle, puis ses heuristiques et ses sites actifs de manière bien plus téméraire que lorsqu'on ne lui demande qu'une interprétation. En mode K en particulier, il doit construire un échafaudage inédit et instable, le faire fonctionner puis le mettre à l'épreuve de l'observation. C'est pourquoi il est très probable que l'anticipation du résultat par l'apprenant accroisse largement la contre-intuitivité des expériences conçues pour bousculer ses conceptions, et en particulier dans les cas où le mode K sera sollicité : pourquoi s'étonnerait-on d'un phénomène que l'on n'a jamais observé et sur lequel on ne s'est jamais interrogé ? Au contraire, le questionnement préalable oblige à se poser la question au moins une fois de ce qui va se produire…

8.1.1.6. Paradigmes, plis cognitifs et inhibition

Mais ces effets ne seront valables que dans le cadre d'un paradigme de pensée donné ; même un pli cognitif trop éloigné risque de ne pas être affecté par l'expérience contre-intuitive si personne n'invite l'apprenant à faire le lien nécessaire. De même, en cas d'inhibition trop forte de la conception à modifier, on peut prévoir que les effets de certaines expériences contre-intuitives s'avèrent décevants. Ainsi, il est possible que la contre-intuitivité, même aménagée par des effets de contexte et de questionnement préalables, ne constitue pas un paramètre suffisant pour bousculer les conceptions voulues, et a fortiori pour susciter des apprentissages. Une hypothèse développée dans la section suivante.

8.1.2. Transformations du savoir

8.1.2.1. Un espace de conceptions ouvert

La description allostérique des transformations du savoir effectuée dans la section *6.4.1. Apprendre…* indique en effet qu'une conception ancienne est rarement détruite pour être remplacée par une autre, et que l'acte d'apprendre doit plutôt être considéré comme *l'émergence d'une possibilité nouvelle de traitement de l'information, réalisée par la modification structurale des schèmes de pensée préexistants ou par celle des règles régissant leur utilisation*. Or en dépit de la perturbation initiale due au résultat de l'expérience contre-intuitive, rien ne semble garantir que la modification de ces schèmes ou l'élaboration de ces nouvelles règles se feront spontanément après la déstabilisation ; ni, si elles le font, que ce sera « dans le bon sens ». Rien ne semble non plus empêcher qu'une fois le souvenir de l'expérience dissipé, les anciennes structures cognitives se remettent en place. Ces éléments et ceux des paragraphes précédents suggèrent que même dans les cas où l'expérience contre-intuitive est conduite dans des conditions optimales, elle risque de ne pas permettre à l'apprenant d'effectuer un véritable apprentissage ; en d'autres termes, que la contre-intuitivité seule constitue un paramètre insuffisant pour apprendre.

8.1.2.2. Effets d'une expérience contre-intuitive sur la fonction de traitement cognitif Ψ_{cog}

Imaginons une expérience produisant un résultat totalement contre-intuitif pour un individu donné, c'est-à-dire incompatible avec ses conceptions : quelle que soit la manière dont l'information reçue (notée $\tilde{\imath}_{ECI}$) est traitée, quels que soient les « lieux du savoir » explorés en mode S ou R, elle entre en contradiction avec les heuristiques et les conceptions sollicitées (qu'il y ait eu effet de contexte et questionnement préalable ou non : le cas échéant, l'interaction sera encore plus mauvaise car l'information se retrouvera dans un environnement totalement incompatible).

En termes de fonction d'affinité de l'espace de conceptions pour l'information reçue, cela se traduit par une explosion de l'ensemble des valeurs prises (au moins localement) par $\Phi_{affin}(\tilde{\imath}_{ECI}, x_1, x_2, \ldots, x_n)$ dans l'espace des $(x_1, x_2, \ldots, x_n)$. Une situation très inconfortable, que l'individu va tenter de résoudre en abaissant la valeur de la fonction de traitement cognitif $\Psi_{cog}(\tilde{\imath}_{ECI}, x_1, x_2, \ldots, x_n, \alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_p)$. Pour ce faire, après avoir exploré l'ensemble des possibilités que lui offre son système cognitif avant perturbation, trois options s'offrent à lui :

1. Il peut en premier lieu rejeter ou renier l'information ; cela peut consister à nier l'observation réalisée, réfuter les conditions dans lesquelles elle a été réalisée, en attribuer le résultat à un autre effet, etc. C'est la solution de facilitée, qui n'est toutefois possible que s'il est effectivement possible de le faire, c'est-à-dire si personne ou aucune autre observation ne vient réaffirmer le résultat de l'expérience.
2. Il peut au contraire l'accepter mais sans effectuer de modification de ses conceptions, en « l'accrochant » au « moins mauvais endroit » pour stabiliser coûte que coûte $\Phi_{affin}(\tilde{\imath}_{ECI}, x_1, x_2, \ldots, x_n)$; ce cas correspond à la description faite dans la section *6.6.7. Des effets d'affinité temporaire* et est susceptible de conduire à l'expression d'interprétations totalement farfelues. Il peut en outre, consciemment ou non, déformer l'information reçue pour lui permettre de mieux s'adapter aux conceptions dont il dispose et s'y ancrer encore davantage.
3. Au cas où il est amené à se rendre compte de l'inadaptation de ses interprétations spontanées et où la nature de l'information est précisée pour qu'elle ne soit pas déformée, il ne peut faire autrement que d'accepter l'information reçue. Il ne lui est alors possible d'agir que sur $\Phi_{réorg}(\alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_p)$. Dans ce cas, on pourra prédire que l'expérience contre-intuitive puisse inciter à la réorganisation des conceptions. Notons que la « réorganisation des conceptions » n'implique pas nécessairement un apprentissage, comme nous le verrons plus loin. Deux cas se présentent alors :
   a. Toute tentative de modification de l'espace des conceptions conduit à un accroissement supplémentaire de $\Phi_{affin}(\tilde{\imath}_{ECI}, x_1, x_2, \ldots, x_n, \alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_p)$, quel que soit le point $(x_1, x_2, \ldots, x_n)$

considéré. On peut prédire dans ce cas un blocage total de l'apprenant, qui ne pourra exploiter ce qu'il aura vu et finira par s'en désintéresser, sans avoir changé de conception initiale.

b. Il existe un point (x_1, x_2, …, x_n) où $\Phi_{affin}(\tilde{\imath}_{ECI}, x_1, x_2, \ldots, x_n, \alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_p)$ décroit rapidement avec la réorganisation (c'est-à-dire la variation des α_i) ; dans ce cas, l'espace des conceptions se réorganise, l'individu passe en mode K et une nouvelle heuristique est créée pour conduire à une conception capable de traiter l'information. Deux nouveaux cas peuvent alors survenir :

   α. Il est prévisible que, dans bien des cas, l'heuristique créée pour faire décroître localement $\Phi_{affin}(\tilde{\imath}_{ECI}, x_1, x_2, \ldots, x_n, \alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_p)$ conduira à une conception inadaptée (voire totalement erronée) si elle est « bricolée » par l'apprenant seul et dans l'urgence. Voire qu'une conception pertinente soit modifiée à la place de celle qui dysfonctionne, et qu'une nouvelle conception, élaborée en mode K, vienne la remplacer inopportunément.

   β. Dans le cas idéal enfin, l'apprenant modifie de lui-même les structures cognitives non adaptées et construit celles qui permettent de rendre compte de l'observation réalisée.

Dans l'ensemble de ces cas, dont un seul conduit à l'apprentissage voulu, on peut commencer à prédire l'importance d'un encadrement et d'un accompagnement efficace de l'utilisation d'une expérience contre-intuitive. Mais même dans ce cas, rien ne garantit que la nouvelle structure de pensée soit stabilisée et conservée durablement, ce sur quoi nous reviendrons plus loin.

8.1.2.3. Représentation graphique

Sous l'influence d'une expérience contre-intuitive, et comme nous l'avons vu dans le paragraphe précédent, ce n'est pas tant le savoir qui est déstabilisé que l'énergie d'interaction entre ce dernier et l'information reçue (et donc $\Phi_{affin}(\tilde{\imath}_{ECI}, x_1, x_2, \ldots, x_n, \alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_p)$). Toutefois, le cas intéressant pédagogiquement se produit lorsque cette déstabilisation de Φ_{affin} se traduit par le besoin de modifier les structures de pensée initiales. Une autre manière de considérer le problème, dans ces cas-là, consiste à prendre en considération les paramètres régissant la stabilité des conceptions et à répercuter la déstabilisation sur la fonction d'apprentissage $\theta_{schème}(\alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_n)$; un procédé théorique qui revient, en pratique, à considérer que la nouvelle information a été intégrée au système cognitif de l'apprenant. Dès lors, il est possible de représenter la fonction θ, après perturbation contre-intuitive, comme le font les chimistes de l'énergie potentielle de réaction après une activation violente (par choc thermique, électrochimique ou photochimique) (figure 81).

8.1.2.4. Passage de l'état de transition

Plaçons-nous dans le cas de figure évoqué ci-dessus : après la réalisation de l'expérience contre-intuitive, le système cognitif de l'apprenant se retrouve dans un état très déstabilisé. La figure 81 semble indiquer que, ce faisant, l'état initial s'est rapproché de l'état de transition. Mais cet effet tient au fait qu'elle représente une voie particulière, choisie pour l'état final vers lequel elle mène. En termes de surfaces d'énergie, il faut plutôt considérer que la zone entourant l'état initial a été nivelée et que, depuis ce point brusquement surélevé, soit la surface reste désespérément plate sans possibilité d'évolution (ce qui pourra conduire au rejet de l'information évoqué plus haut), soit qu'une ou plusieurs vallées (et donc plusieurs états de transition) s'offrent à la vue. Rappelons toutefois que seul le théoricien jouit de cette « vue » générale : l'apprenant ne peut guère que tenter de prévoir, avec une très « courte-vue », les directions dans lesquelles il peut organiser son savoir.

Parmi elles, rien ne garantit qu'il trouvera la « bonne », celle vers laquelle l'expérience contre-intuitive a été conçue pour le diriger ; en effet et pour ce faire, il est nécessaire qu'il dispose de toutes les informations nécessaires pour construire son nouveau schème (en d'autre termes, que l'apprentissage visé soit dans sa zone proximale de développement) et qu'il mette en œuvre le pli cognitif adéquat. Il

est au contraire bien possible qu'en vertu du *principe d'économie* évoqué à la section *6.5.7.*, et à moins qu'il ne se décourage complètement, il exploite en mode R une vallée « localement satisfaisante », correspondant à un schème à peu près opératoire sur le moment et qu'il s'en contente ; en désinhibant une heuristique inappropriée, par exemple. Mais il est également envisageable qu'il construise en mode K un schème totalement farfelu, de manière à relâcher coûte que coûte la tension cognitive suscitée par l'observation.

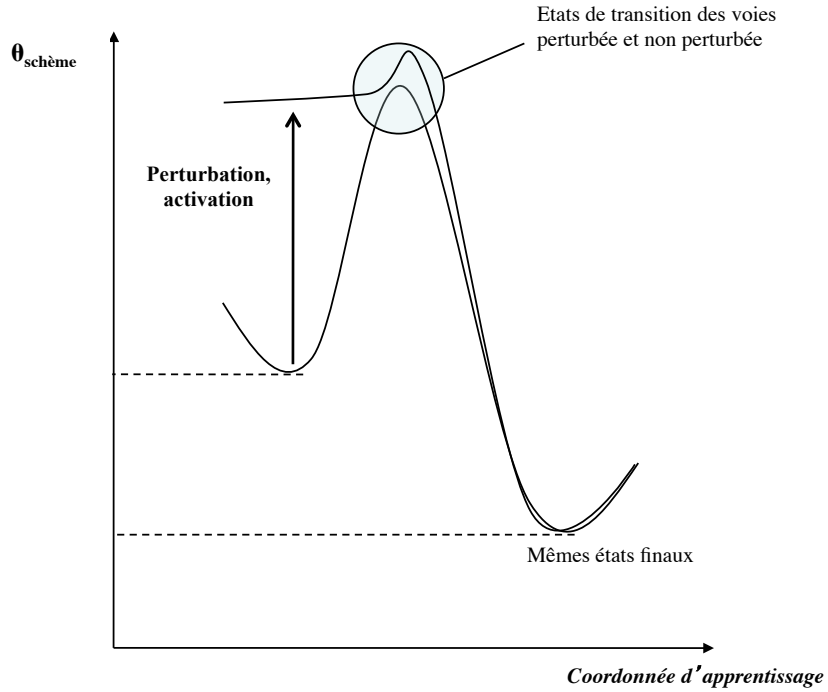


Figure 81 : Illustration graphique de l'effet d'une expérience contre-intuitive sur l'hypersurface d'énergie potentielle des conceptions et sur le passage de l'état de transition.

Pour résumer, on peut donc prédire que sans accompagnement pédagogique, un risque possible lié à la contre-intuitivité réside dans le renforcement de conceptions ou de métaconceptions erronées, en la désinhibition inopportune d'heuristiques inadaptées, voire en la construction de nouveaux schèmes plus faux que ceux que l'expérience contre-intuitive prétendait remplacer. Pour limiter ce risque, toutes les manières de faire habituelles pour faciliter le passage de l'état de transition restent pertinentes : effet template, effet catalyse, voire effet tunnel si l'enseignant parvient à faire entrevoir la nature du nouveau schème à construire après la perturbation cognitive.

8.1.2.5. Rôle de la zone proximale de développement

Comme nous l'avons évoqué ci-dessus, pour que l'apprenant puisse bénéficier de l'expérience contre-intuitive pour effectuer un véritable apprentissage, il est bien naturellement nécessaire qu'il se situe dans sa zone proximale de développement. Or on peut prédire que dans certains cas idéaux, cette dernière soit si accessible qu'il suffira de quelques informations supplémentaires pour que, depuis son état déstabilisé, l'apprenant trouve presque seul et rapidement la voie conduisant à un nouveau schème pertinent. C'est ce qui se produit dans l'exemple mainte fois évoqué dans ce texte de la question de la forme de l'ombre de la Lune.

A la personne qui répond qu'elle provient de l'ombre projetée de la Terre sur notre satellite, on peut montrer l'image très contre-intuitive de la figure 82. A ce stade, certaines personnes (celles qui s'étaient trompées d'heuristique notamment) trouvent d'elles-mêmes la solution exacte mais, comme

cela a été décrit, pas toutes. Comme nous l'avons prédit plus haut, cette nouvelle image rend le problème encore plus opaque pour certaines d'entre elles, qui ne comprennent même pas pourquoi elle est contre-intuitive.

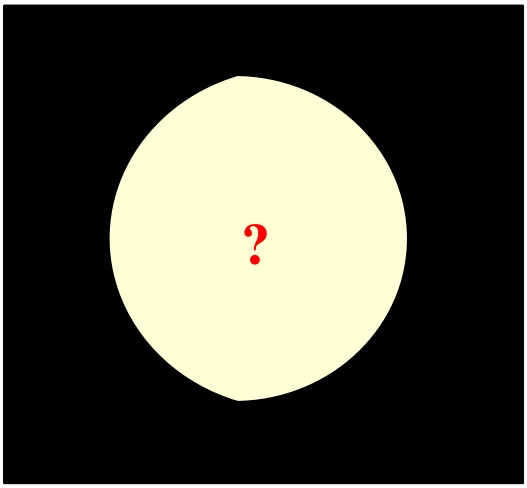


Figure 82 : Image contre-intuitive permettant de mettre en doute l'idée selon laquelle la forme du croissant de Lune proviendrait de l'ombre de la Terre.

Mais l'expérience montre que pour certains autres, le fait de montrer cette fois la figure 83 suffit à déclencher la compréhension. Dans le second cas, la zone proximale de développement est un peu moins accessible que dans le premier, mais on reste dans le cadre idéal de l'application de l'expérience contre-intuitive, dont la seule perturbation suffit à entraîner l'apprentissage.

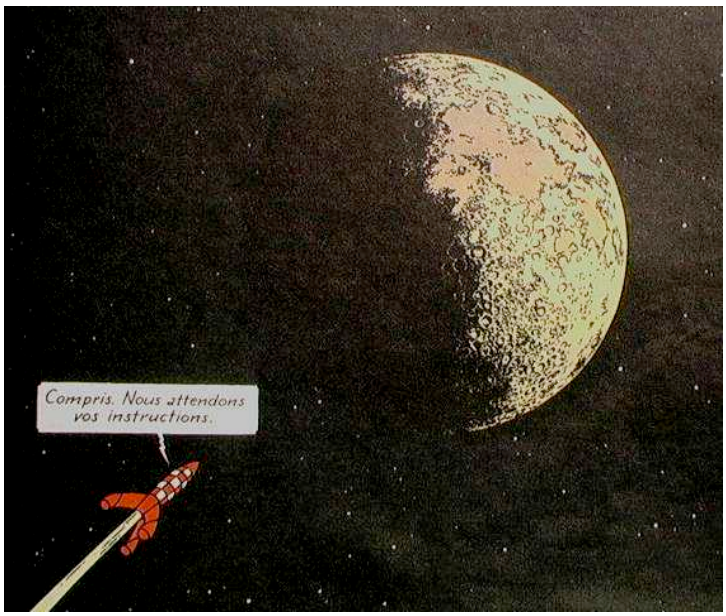


Figure 83 : Hergé : on a marché sur la Lune (1954).
Une image suffisante pour permettre la compréhension de la forme du croissant de Lune chez certaines personnes.

Outre l'accompagnement de l'apprenant par l'enseignant lors de la réalisation d'une expérience contre-intuitive, il semble donc pertinent de s'assurer que sont réunies toutes les conditions préalables, non seulement à sa compréhension mais également à l'appréhension des connaissances à atteindre.

8.1.3. Eléments complémentaires

D'autres prédictions théoriques, de natures variées, peuvent être réalisées quant aux caractéristiques de l'expérience contre-intuitive :

- En termes entropiques, on peut prévoir qu'un trop fort stress au moment de l'interprétation (stress exogène sous la pression de la situation pédagogique, ou endogène sous la pression de la contradiction entre le résultat de l'expérience et les propres connaissances de l'apprenant) contribue à rigidifier les voies cognitives vers de nouveaux schèmes de pensée, c'est-à-dire à resserrer les vallées correspondantes. Une approche plus détendue devrait dès lors permettre un apprentissage plus aisé et une efficacité pédagogique plus grande de la perturbation initiale.
- En termes de stabilisation énergétique, l'expérience contre-intuitive étant conçue pour bousculer les conceptions initiales et non pas pour enseigner des notions complémentaires, on ne peut guère attendre d'elle qu'elle stabilise de nouvelles conceptions, si ce n'est par les conditions mémorables qu'elle crée. L'essentiel de ce rôle de mémorisation devrait théoriquement appartenir à l'enseignant accompagnateur qui, après la phase de déstabilisation, devra prendre en main l'apprentissage pour qu'il conduise à des schèmes durables. On peut en revanche s'attendre à ce que, dans certains cas, les conceptions initiales, mêmes si elles ne sont pas remplacées par de nouveaux schèmes, soient déstabilisées durablement.
- Enfin, l'expérience contre-intuitive étant susceptible de conduire à la construction de schèmes de pensée erronés, il est probable que ces derniers résistent d'autant moins à la confrontation avec le savoir stabilisé de l'apprenant qu'il aura construit ces schèmes rapidement. En d'autres termes, c'est sous contrôle thermodynamique que l'expérience contre-intuitive devrait présenter le moins de risques en termes de stabilisation d'idées fausses, comme nous l'évoquions déjà à la section *6.6.6. Des contrôles cinétique et thermodynamique*.
- Enfin, en termes de contrôles péricognitifs, on peut prédire une plus grande efficacité de l'expérience contre-intuitive si elle s'accompagne d'une réflexion individuelle de l'apprenant sur l'origine du biais perturbé par l'observation du résultat, sur le sentiment que cela lui procure, sur les différentes voies substitutives qui s'offrent à lui. Une approche métacognitive d'ailleurs utile dans tous les apprentissages.
- Un point qui n'a pas été évoqué, et qui contribue à faire de l'expérience contre-intuitive un bon outil pédagogique, réside dans son caractère spectaculaire. Ce dernier est en effet susceptible de contribuer à une certaine motivation à « en savoir plus », et donc à fournir l'*impulsion* nécessaire pour franchir la barrière d'activation de l'apprentissage visé. Reste que la meilleure manière de susciter la motivation sera tout de même de la « forcer » en déstabilisant suffisamment une conception initiale pour obliger l'apprenant à en trouver une autre, et donc à franchir un ou plusieurs état(s) de transition… avec les risques (évoqués plus haut) que cela comporte.

Le modèle allostérique formalisé permet donc de prévoir qu'employée sans précautions, l'expérience contre-intuitive risque de s'avérer totalement inutile, voire néfaste pour l'élève. On prédit par suite que, pour être contre-intuitive sans être contre-productive, pour permettre d'atteindre les objectifs pour lesquels elle est imaginée, une telle expérience doit être inscrite dans un contexte qui présente certains critères indispensables et l'apprenant soumis à un accompagnement pédagogique particulier.

8.1.4. Synthèse des prédictions théoriques à vérifier

La synthèse des divers points de cette analyse permet de formuler huit prédictions théoriques principales, reproduites ci-dessous. Ce sont elles que la recherche de terrain devra mettre à l'épreuve pour terminer de valider le modèle allostérique formalisé dont elles découlent.

8.1.4.1. Prédiction 1 : performance de l'outil

Du point de vue de la recherche didactique autant que de la pratique pédagogique, l'expérience contre-intuitive est un outil très performant pour faire émerger et perturber les *conceptions* des apprenants, mais aussi pour les motiver à s'intéresser au sujet.

8.1.4.2. Prédiction 2 : cadre de référence

Une expérience est rarement contre-intuitive dans l'absolu et « par nature ». Pour qu'elle puisse le devenir, sa mise en œuvre expérimentale doit être comprise aisément et elle doit être adaptée au *cadre de référence* de l'apprenant pour qu'il identifie sans équivoque le problème posé, ce qui suppose de sa part un niveau de connaissances minimal.

8.1.4.3. Prédiction 3 : contre-intuitivité

Pour pouvoir être qualifiée de contre-intuitive, une expérience doit entrer en conflit avec certaines connaissances acquises. Elle nécessite donc un niveau de connaissances particulier au-delà des frontières duquel elle n'est pas contre-intuitive.

8.1.4.4. Prédiction 4 : contexte et mise en scène

La reconnaissance des biais cognitifs relatifs à une expérience donnée permet d'aménager des effets de contexte et de mise en scène qui permettent d'accroître, voire de créer, le phénomène de contre-intuitivité. Un effet exacerbé en situation en stress.

8.1.4.5. Prédiction 5 : questionnement préalable

Pour qu'une expérience soit réellement contre-intuitive pour un apprenant, il faut surtout que celui-ci ait eu l'occasion de faire appel à son intuition et/ou à ses connaissances avant de la mettre en œuvre, c'est-à-dire qu'il ait eu la possibilité *d'anticiper* le résultat qui pourrait survenir. En l'absence de questionnement préparatoire ou préalable, il risque d'en accepter facilement le résultat, sans autre interrogation particulière.

8.1.4.6. Prédiction 6 : limites de la contre-intuitivité

Si une bonne adéquation de l'expérience au cadre de référence de l'apprenant et un questionnement préalable (lui offrant la possibilité de formuler une réponse spontanée au problème posé) sont nécessaires à la contre-intuitivité, ils ne sont pas pour autant suffisants pour permettre à l'apprenant de dépasser ses conceptions et de donner une interprétation correcte du phénomène observé, notamment si cette interprétation n'appartient pas à sa zone proximale de développement ou si les conceptions nécessaires à cette interprétation sont inaccessibles ou inhibées.

Divers cas peuvent alors se produire :

- mauvaise perception du résultat de l'expérience,
- non utilisation de l'information perturbatrice,
- inaccessibilité des concepts nécessaires à la compréhension,
- abandon,
- contestation de l'observation,
- adaptation de l'information aux conceptions initiales,
- rejet de l'information.

8.1.4.7. Prédiction 7 : risques et effets néfastes

Dans le cas où la contre-intuitivité s'exprime mais où le phénomène mis en œuvre n'est pas spontanément compris par l'apprenant, ce type d'expérience est en outre susceptible d'avoir divers effets néfastes sur l'apprentissage, en contribuant notamment :

- au découragement vis-à-vis du sujet ou de la discipline,
- au renforcement des conceptions initiales,
- à la création de nouvelles conceptions et métaconceptions erronées,
- à l'adoption d'heuristiques inadéquates,
- voire à la destruction de conceptions initialement correctes.

8.1.4.8. Prédiction 8 : accompagnement

Au-delà de l'adéquation au cadre de référence, de la mise en contexte et d'un questionnement pertinent préalable à l'expérience, plusieurs paramètres sont nécessaires pour qu'elle soit non seulement systématiquement contre-intuitive, mais encore pour que l'information perturbatrice ne soit pas éludée, ne conduise ni à un ancrage ni à la création de conceptions fausses, et qu'elle participe ainsi d'un réel apprentissage :

- identification des conceptions initiales,
- vérification du cadre de référence et de la zone proximale de développement,
- accompagnement tout au long de l'expérience,
- décomposition des étapes pour faciliter la compréhension,
- dédramatisation de la difficulté,
- orientation vers l'utilisation des bons schèmes,
- aide à la construction et à la stabilisation des nouveaux,
- aménagement d'un temps d'échange et de réflexion suffisant,
- incitation à une réflexion métacognitive sur l'ensemble du processus.

8.2. Résultats

Le détail des entretiens ayant servi à rédiger la synthèse ci-dessous figure dans l'annexe *12.2. Résultats de la recherche expérimentale*. Ils sont synthétisés dans la présente sous-partie, et organisés de manière à permettre de vérifier les prédictions théoriques formulées plus haut et validées par le *diagnostic préalable* (section *8.2.1.*).

Pour ce qui concerne la *recherche préliminaire* (section *8.2.2.*) et le pré-test de la *recherche d'approfondissement* (section *8.2.3.*), les deux dimensions, expérimentale et théorique, sont systématiquement mises en regard : pour chaque prédiction, un tableau de la section *12.2.1. Tableaux récapitulatifs des entretiens confirmant les prédictions relatives à l'expérience contre-intuitive* précise les numéros des entretiens qui la confirment ou la contredisent.

La section relative à la recherche d'approfondissement fait l'objet d'un traitement similaire mais, dans la mesure où moins d'individus ont été interrogés, sur des questions plus ciblées, elle privilégie l'analyse fine des réponses individuelles à l'accumulation de réponses corroborant ou infirmant telle ou telle prédiction. Elle va plus loin que la recherche préliminaire en apportant des informations complémentaires relatives à l'expérience contre-intuitive, dont nous montrons qu'elles sont compatibles avec la théorie allostérique développée plus haut.

8.2.1. Diagnostic préalable

Comme nous l'avons indiqué dans le paragraphe *5.4.4.1.*, le *diagnostic préalable* a été effectué de manière qualitative, par l'observation et la discussion avec les participants des ateliers-animations des *Atomes Crochus*, sur une période de plusieurs mois en 2001. Il a permis de formuler un certain nombre de constats qui, mis en regard avec les prédictions théoriques du modèle allostérique formalisé, peuvent être formulés de manière à leur correspondre point pour point, certes sous des formes simplifiées, mais constituant d'ores et déjà globalement des indices de validation de ces prédictions.

Ces observations préalables, alors publiées dans Eastes & Pellaud (2004b & 2004c), réorganisées et reformulées pour correspondre aux 8 prédictions théoriques développées plus haut, sont les suivantes :

Observation 1 : Du point de vue de la recherche didactique, l'expérience contre-intuitive est un outil très performant pour faire émerger les conceptions des apprenants (préd. 1).

Observation 2 : Une expérience est rarement contre-intuitive dans l'absolu et « par nature ». Pour qu'elle le devienne, elle doit avant tout être adaptée au cadre de référence de l'apprenant (préd. 2).

Observation 3 : Pour pouvoir être qualifiée de contre-intuitive, une expérience nécessite un niveau de connaissances particulier pour pouvoir entrer en conflit avec certaines connaissances acquises (préd. 3).

Observation 4 : Une *mise en scène* est parfois nécessaire pour accroître, voire créer, l'effet de contre-intuitivité (préd. 4).

Observation 5 : Mais pour qu'une expérience soit réellement contre-intuitive pour un apprenant, il faut surtout que celui-ci ait eu la possibilité *d'anticiper* le résultat qui pourrait survenir (préd. 5).

Observation 6 : Le questionnement préalable est insuffisant pour permettre à l'apprenant de dépasser ses conceptions et de donner une interprétation correcte du phénomène (préd. 6).

Observation 7 : Dans le cas où la contre-intuitivité s'exprime mais où le phénomène mis en œuvre n'est pas spontanément compris par l'apprenant, ce type d'expérience est en outre susceptible d'avoir divers effets néfastes sur l'apprentissage (préd. 7).

Observation 8 : Il est possible de formuler quelques conditions idéales de réalisation de l'expérience contre-intuitive, permettant d'exploiter ses caractéristiques pour conduire à un apprentissage réel et durable (préd. 8).

A titre d'exemple, l'anecdote citée à la section *6.6.6. Des contrôles cinétique et thermodynamique*, portant sur une conception fausse induite par une expérience contre-intuitive chez un enfant à qui on avait demandé de prédire –puis de mesurer– la différence de température entre une chaussette de laine et une feuille d'aluminium roulées en boules, illustre parfaitement le type d'observations réalisées dans le cadre du diagnostic préalable. A elle seule, elle relève en effet des observations 1, 6, 7 et 8.

Quant aux autres observations, elles nous ont été inspirées par des constats extrêmement simples à faire : il suffit d'observer le comportement du public autour des expériences contre-intuitives exposées dans les coursives du premier étage du *Palais de la Découverte* (expérience du brachistochrone par exemple) pour se rendre compte que, lorsque les visiteurs ne lisent pas les indications avant de réaliser les expériences et/ou qu'elles n'évoquent rien pour eux, elles sont totalement insignifiantes et leurs résultats sont acceptés sans étonnement particulier. Des constats qui illustrent les propositions 2, 3 et 5 qui, dans notre diagnostic préalable, correspondent par exemple à l'observation de l'absence totale de surprise lors de la réalisation de l'expérience de Galilée (course des balles) par des participants aux ateliers à qui il n'avait pas été demandé de prévoir le résultat.

Quant à l'observation 4, elle est commune à toute activité pédagogique fondée sur l'expérimentation. Mais du point de vue de la contre-intuitivité, il est facile d'observer que lorsqu'une expérience conduisant au résultat « intuitif » est présentée avant l'expérience contre-intuitive portant sur un phénomène analogue, la contre-intuitivité est renforcée.

8.2.2. Recherche préliminaire (2002)

Cette section présente les résultats compilés de la recherche préliminaire menée en 2002 à la *Cité des Sciences et de l'Industrie*, sous la forme d'une synthèse expérimentale validant les diverses prédictions formulées plus haut et proposant quelques résultats complémentaires, auxquels s'ajoutent l'analyse des limites de la recherche.

Chaque affirmation fait référence au tableau annexe correspondant présenté dans l'annexe *12.2.1. Tableaux récapitulatifs validant les prédictions théoriques sur l'expériences contre-intuitive*, qui présente systématiquement la liste de tous les entretiens ayant permis de la formuler, et s'accompagne de quelques exemples illustratifs destinés à en faciliter la compréhension. Lesdits entretiens sont pour leur part présentés dans d'autres tableaux, plus détaillés encore, figurant également dans l'annexe *12.2.2. Tableaux récapitulatifs des entretiens*. Pour un rappel de la formulation des expériences, du matériel mis à disposition, des concepts scientifiques concernés, de la nature de la contre-intuitivité et des interprétations des phénomènes observés, se référer aux tableaux 5 et 6 de la section *5.4.1. Support expérimental de la recherche*.

Notons encore qu'un même entretien peut souvent être utilisé pour faire plusieurs constats différents ; dans la suite, nous avons cherché à privilégier la diversité des exemples plutôt qu'à reciter plusieurs fois les mêmes à chaque fois qu'ils étaient applicables.

8.2.2.1. Validation de la prédiction 1 : performance de l'outil

Prédiction 1 : Du point de vue de la recherche didactique autant que de la pratique pédagogique, l'expérience contre-intuitive est un outil très performant pour faire émerger et perturber les conceptions des apprenants, mais aussi pour les motiver à s'intéresser au sujet.

- *Observation 1.1.* Les enregistrements montrent que c'est le cas non seulement avant l'expérience, lors du questionnement préalable (tableau annexe 1a) et surtout en présence de tiers lorsqu'ils n'ont pas d'ascendant sur l'expérimentateur (parents, enseignants…), mais également et surtout après l'observation du résultat (tableau annexe 1b).

  Exemple : Ainsi on découvre, contre toute attente, que certains enfants pensent que l'aluminium est plus chaud que la laine (entretien *5). Il s'agit d'un cas intéressant de réponse en mode K, où la conception utile n'étant pas construite, l'enfant utilise une autre connaissance (« *les pompiers utilisent des couvertures en aluminium pour protéger les grandes brûlés du froid* »), malheureusement inadaptée pour répondre au problème posé car nécessitant la compréhension simultanée d'autres phénomènes (la notion de rayonnement thermique en plus de celle de conduction, en l'occurrence).

- *Observation 1.2.* L'entretien après expérience est généralement beaucoup plus riche pour le chercheur didacticien lorsqu'un questionnement préalable a été suscité (et les hypothèses verbalisées) : l'apprenant s'étant alors impliqué et investi dans l'expérience, il est plus motivé pour trouver une explication adaptée à l'observation qu'il a faite… voire pour soigner un amour-propre mis à mal dans la première phase (tableau annexe 1c). Le phénomène est particulièrement observable chez les adultes.

  Exemples : Après la réalisation de l'expérience, probablement de par son côté un peu « magique », c'est avec le ludion que le chercheur obtient les conceptions fausses les plus intéressantes, sur la pression par exemple (« *La pression fait que ça descend, ça fait remonter des bulles d'air… j'en sais rien. Je sais pas, ça condense, il y a une masse qui est plus forte autour de l'objet et donc ça fait descendre, comme si en fait, l'eau était une sorte de gélatine et ça le comprime et ça le pousse vers le bas* », entretien *47), mais aussi sur le magnétisme supposé des trombones, l'effet des bulles, etc.

- *Observation 1.3.* C'est également le cas en l'absence de questionnement préalable, mais dans une moindre mesure (tableau annexe 1d).

Exemples : Nombreuses sont les personnes étonnées par la mesure identique de la température de la laine et de l'aluminium, même sans questionnement préalable. Ainsi, cet enfant qui imaginait la laine plus chaude se réfère à une autre propriété pour interpréter son résultat : « *l'alu prend [davantage] le soleil* » (entretien *17).

- *Observation 1.4.* Ces exemples illustrent en outre le fait que ces expériences, lorsqu'elles sont de type « expériences impossibles » présentées sous forme de défis, favorisent l'émergence de conceptions très éloignées des phénomènes mis en œuvre (souvent davantage liées au matériel et à une foule de détails annexes), même si elles ne favorisent pas la formulation des conceptions initiales (le participant ne sachant dans quelle direction aller). Un phénomène intéressant pour le chercheur, bien que cela constitue une limite en termes pédagogiques lorsqu'elles sont employées pour susciter un apprentissage (tableau annexe 1e).

  Exemples : Autant dans l'expérience du ludion que dans celle des feuilles amoureuses, le rôle des trombones est souvent invoqué : « *Les trombones vont "crocher" le carton, en même temps que le sèche-cheveux va l'aspirer* » (entretien 75). Dans celle des feuilles amoureuses, c'est l'électricité statique qui est citée (81) : « *peut-être parce quand on se lave les cheveux (…) ils brûlent parce que j'avais mis trop près, c'est la chaleur qui attire (…). Franchement comme je suis pas du tout scientifique je fais pas la différence… pour moi l'électricité statique c'est toujours un peu de la chaleur* ».

8.2.2.2. Validation de la prédiction 2 : cadre de référence

Prédiction 2 : Une expérience est rarement contre-intuitive dans l'absolu et « par nature ». Pour qu'elle puisse le devenir, sa mise en œuvre expérimentale doit être comprise aisément elle doit être adaptée au cadre de référence de l'apprenant pour qu'il identifie sans équivoque le problème posé, ce qui suppose de sa part de sa part un niveau de connaissances minimal.

- *Observation 2.1.* L'absence de boîtes noires est indispensable pour permettre la compréhension de la manipulation. L'observation des dispositifs employés doit être aisée, tout comme l'identification de leurs différents éléments (tableau annexe 2a).

  Exemple : dans l'entretien *5, par exemple, un adolescent nous dira que « *la sonde du thermomètre émet un courant électrique* » ; partant, toute observation peut être interprétée à l'aune de cette idée, et l'expérience perd sa contre-intuitivité.

- *Observation 2.2.* Même remarque pour les détails superflus qui troublent la compréhension de la manipulation ou induisent des raisonnements farfelus en multipliant les paramètres apparemment et potentiellement significatifs (cas des dixièmes de degrés sur le thermomètre), tuant ainsi parfois la contre-intuitivité de l'expérience (tableau annexe 2b).

  Exemples : C'est notamment souvent le cas avec les bulles, déjà évoquées, comme dans l'entretien *48 : « *l'eau va se mélanger à l'air, créer des microbulles telles que l'on voit là (il montre la bouteille) donc il y a plus de pression au sein de la bouteille lorsqu'on relâche cette pression-là, l'air a tendance à remonter* », ou dans l'entretien *70 où le participant adulte suppose que « *les trombones sont aimantés* », ou encore dans l'entretien *36b où la fillette s'intéresse rebond des balles, faute du cadre de référence adapté pour comprendre leurs mouvements respectifs.

- *Observation 2.3.* Ces aspects (adéquation au cadre de référence, absence de boîtes noires) sont également nécessaires pour susciter un intérêt minimum de la part de l'apprenant pour l'expérience proposée (tableau annexe 2c).

  Exemple : Ainsi, dans l'entretien *73, l'absence total d'idée sur ce qui pourrait se passer lorsqu'on approche le sèche-cheveux de la seconde feuille cartonnée conduit à un désintérêt de la fillette pour l'expérience.

8.2.2.3. Validation de la prédiction 3 : contre-intuitivité

Prédiction 3 : Pour pouvoir être qualifiée de contre-intuitive, une expérience doit entrer en conflit avec certaines connaissances acquises. Elle nécessite donc un niveau de connaissances particulier, au-delà des frontières duquel elle n'est pas contre-intuitive.

- *Observation 3.1.* Le cadre de référence joue en effet de deux façons : il permet d'une part la compréhension de la manipulation et induit d'autre part des conceptions qui vont servir de grille d'analyse. Si ces conceptions n'existent pas, l'expérience ne pourra pas être contre-intuitive (tableau annexe 3).

  Exemples : Ainsi dans l'expérience des feuilles amoureuses, très souvent en-dehors du cadre de références des participants compte tenu de la difficulté des notions scientifiques mises en jeu, un garçon n'est pas étonné du résultat puisque « *le sèche-cheveux aspire* » (*79). Une autre participante adulte (*81), pas tellement étonnée non plus, nous dira « « *Non, c'est un phénomène de chaleur, c'est l'électricité statique, je ne sais pas* ».

- *Observation 3.2.* Un niveau de connaissances maximal délimite également le cadre de référence adapté à l'expérience contre-intuitive : le physicien habitué au phénomène ne le trouvera pas contre-intuitif. Tel fut souvent le cas de personnes non interrogées dans le cadre de la recherche mais qui participaient à l'atelier, qui connaissaient les expériences ou les théories explicitant les phénomènes mis en œuvre (expérience de Galilée, théorème de Bernoulli, etc.). A l'inverse, certaines personnes se souvenant de leurs études de physique s'étonnent de voir qu'une balle de tennis et une balle de pingpong lâchées côte à côte n'atteignent pas le sol en même temps (à cause des effets de résistance de l'air non négligeables, qu'ils ont oubliés) : la contre-intuitivité se déplace donc en fonction des connaissances, qui définissent pour chaque phénomène une « fenêtre de contre-intuitivité » bien délimitée.

8.2.2.4. Validation de la prédiction 4 : contexte et mise en scène

Prédiction 4 : La reconnaissance des biais cognitifs relatifs à une expérience donnée permet d'aménager des effets de contexte et de mise en scène qui permettent d'accroître, voire de créer, le phénomène de contre-intuitivité. Un effet exacerbé en situation en stress.

Cette prédiction n'a pas été testée dans le cadre de cette recherche préliminaire. Toutefois, la conception même de « l'atelier des expériences impossibles » des *Atomes Crochus* repose sur ce principe, qui s'en trouve validé de manière très pragmatique : à la manière du prestidigitateur qui ouvre la boîte et la tourne en tous sens avant d'y faire entrer sa partenaire et d'y planter des sabres, à la manière du jongleur qui fait tomber ses quilles avant d'en prendre une de plus et de réussir son tour, le médiateur scientifique n'hésite pas, dans cet atelier, à montrer d'abord le phénomène « habituel » (celui qui va induire la contre-intuitivité), avant de réaliser l'expérience : secouer un récipient contenant de l'huile et de l'eau pour les mélanger avant l'expérience de la « ségrégation », faire toucher un morceau de métal et un pull en laine avant l'expérience « Chaud ou froid ? », montrer qu'un œuf cuit tourne plus vite qu'un œuf cru avant de les laisser rouler sur un plan incliné (où l'on constatera que le cru descend plus vite…).

8.2.2.5. Validation de la prédiction 5 : questionnement préalable

Prédiction 5 : Pour qu'une expérience soit réellement contre-intuitive pour un apprenant, il faut surtout que celui-ci ait eu l'occasion de faire appel à son intuition et/ou à ses connaissances avant de la mettre en œuvre, c'est-à-dire qu'il ait eu la possibilité d'anticiper le résultat qui pourrait survenir. En l'absence de questionnement préparatoire ou préalable, il risque d'en accepter facilement le résultat, sans autre interrogation particulière.

- *Observation 5.1.* Ainsi l'observation de fantastiques expériences contre-intuitives au *Palais de la Découverte*, par exemple, conduit à la décevante constatation qu'elles ne suscitent souvent ni

intérêt ni interrogations particulières, devenant de simples manipulations « presse-bouton ». A l'inverse, les participants à notre recherche ont toujours fait preuve d'une grande avidité lors des séances « d'explications » frontales qui succédaient aux « ateliers des expériences impossibles » qui leurs avaient été présentés.

- *Observation 5.2.* Or le dépouillement des entretiens met justement en évidence le fait que le questionnement (ciblé sur les phénomènes mis en œuvre dans l'expérience) est souvent nécessaire à la contre-intuitivité (tableau annexe 5a).

  Exemples : Pour une même expérience, les entretiens de type 2 conduisent très nettement à bien moins d'étonnement que leur forme analogue, avec questionnement préalable. C'est notamment le cas de *Chaud ou froid ?* (*15, 16, 18…) et de la *course des balles* (*41, *42…). A l'inverse, ces expériences n'étant jamais prévues correctement dans les entretiens de type 1, elles sont toujours contre-intuitives. Ainsi dans l'entretien *29, la prévision du jeune homme selon laquelle la balle de tennis arrivera en premier est accompagnée de l'interprétation suivante : « *P=mg ; plus le poids est important, plus l'accélération se fera moins rapidement, donc la balle de tennis arrivera normalement avant la boule de pétanque »… « Sur une petite distance la balle de tennis aurait tendance à se poser plus rapidement alors que sur grande distance, l'accélération aidant, le poids le plus lourd va prendre de plus en plus de vitesse et donc descendre de plus en plus rapidement* ».

- *Observation 5.3.* Parmi ces entretiens, certains sont de type 1 ; cela s'explique par le fait que certaines expériences étaient proposées sous la forme de défis expérimentaux, où une réflexion préalable était parfois nécessaire. Mais dans certains cas, même en l'absence d'entretien préalable, des apprenants sont très étonnés des résultats observés (tableau annexe 5b). Cela ne signifie pas, au demeurant, qu'il n'y ait pas eu de questionnement spontané avant qu'ils ne réalisent les expériences.

  Exemple : Ainsi dans l'entretien *43, suite à une manipulation imprécise, une dame retraitée observe la balle de tennis arriver en premier, puis s'en étonne car elle pensait que ce serait le contraire.

- *Observation 5.4.* Dans certains des cas ci-dessus, il est toutefois possible (et cela constitue l'une des limites de notre recherche) que l'entretien postérieur à l'expérimentation favorise l'émergence d'une contre-intuitivité *a posteriori*, qui ne se serait pas manifestée autrement. D'où le nombre important de cas recensés.

- *Observation 5.5.* Il semblerait également (bien que ce sentiment n'ait pas valeur de preuve) que dans les cas où le questionnement préalable a été éludé, le résultat de l'expérience soit moins bien mémorisé par l'apprenant ; peut-être parce qu'il s'est moins impliqué et a donc été moins perturbé. Le souvenir du résultat n'est toutefois pas une garantie d'apprentissage, conformément à la prédiction 6.

8.2.2.6. Validation de la prédiction 6 : limites de la contre-intuitivité

Prédiction 6 : Si une bonne adéquation de l'expérience au cadre de référence de l'apprenant et un questionnement préalable (lui offrant la possibilité de formuler une réponse spontanée au problème posé) sont nécessaires à la contre-intuitivité, ils ne sont pas pour autant suffisants pour permettre à l'apprenant de dépasser ses conceptions et de donner une interprétation correcte du phénomène observé, notamment si cette interprétation n'appartient pas à sa zone proximale de développement ou si les conceptions nécessaires à cette interprétation sont inaccessibles ou inhibées. Divers cas peuvent alors se produire : mauvaise perception du résultat de l'expérience, non utilisation de l'information perturbatrice, inaccessibilité des concepts nécessaires à la compréhension, abandon, contestation de l'observation, adaptation de l'information aux conceptions initiales, rejet de l'information…

- *Observation 6.1.* On observe tout d'abord que le simple questionnement préalable est parfois (bien que très rarement) insuffisant pour susciter la contre-intuitivité même (tableau annexe 6a).

Exemple : Dans l'entretien *26, la participante n'est pas étonnée que le résultat ait été difficile à prévoir et ne s'en émeut par suite pas vraiment.

- *Observation 6.2.* C'est notamment le cas lorsque ce questionnement est proposé sous forme de défi dans les expériences de type « expériences impossibles » ; en effet, la contre-intuitivité ne peut alors émerger que si le défi a été résolu, ce qui n'est pas toujours le cas (tableau annexe 6b).

  Exemple : Dans l'entretien *66, aucun des deux enfants ne trouve le « truc » pour actionner le ludion. Après démonstration, ils n'ont toujours aucune explication. Après une observation supplémentaire et accompagnée, ils ne parviennent pas à identifier l'air. Pour eux, dans la pipette, il n'y a « *rien* ». Le chercheur la sort alors de la bouteille et souffle l'air au visage des enfants. Ceux-ci l'identifient. « *L'air elle sort pas, sinon ça fait des bulles* ». A la question « *Ca veut dire que l'air, il reste dedans ?* », aucune réponse n'est proposée par les enfants.

- *Observation 6.3.* On note par ailleurs que l'information perturbatrice n'est pas nécessairement utilisée par l'apprenant pour faire évoluer ses conceptions initiales, même si elles ont été formulées et mises en défaut. C'est notamment le cas lorsque elles le conduisent à mal percevoir l'information fournie par l'expérience (tableau annexe 6c).

  Exemples : C'est le cas de l'interprétation des feuilles amoureuses faisant appel au fait que « le sèche-cheveux aspire », évoquée plus haut (*79), ou de la course des balles lorsque l'observation est perturbée par la conviction originelle (35a).

- *Observation 6.4.* C'est aussi le cas lorsqu'elles le conduisent à l'adapter à ses conceptions initiales (tableau annexe 6d)…

  Exemple : Dans l'entretien *5, l'explication donnée à l'expérience de la laine et de l'aluminium ne tient pas à la notion de *température ambiante*, mais de configuration de l'expérience : « *Parce qu'elle est pliée, il y a plus de chaleur et celle-là aussi elle est mise en boule, la chaleur elle est à l'intérieur* ». Question du chercheur : « *Si on les déplie elles seront à la même température ?* » Réponse : « *L'aluminium [sera plus chaud] parce que si y a du vent qui passe dessus, là y a des trous (en parlant de la laine) là y en a pas* ».

- *Observation 6.5.* C'est encore le cas lorsqu'elles le conduisent à contester l'observation (invocation du cas particulier, mise en cause de la mesure, de la méthode utilisée…) (tableau annexe 6e).

  Exemple : Dans l'entretien *3, l'observation est admise mais mise en cause pour d'autres températures, la question posée par la participante étant notamment de savoir si, « *en cas de gel, la chaussette et la laine afficheront toutes deux la même température de -10°C par exemple* ».

- *Observation 6.6.* Même constat lorsqu'elles le conduisent à rejeter l'information perturbatrice, et éventuellement l'oublier (tableau annexe 6f).

  Exemple : Dans l'entretien *31, le garçon avait prévu l'arrivée de la balle de tennis en premier. Après avoir réalisé l'expérience, il reste sur l'idée « *qu'elle aurait dû aller plus vite* ».

- *Observation 6.7.* C'est enfin également le cas lorsque l'interprétation de l'expérience fait appel à des phénomènes incompréhensibles pour l'apprenant, c'est-à-dire situés hors de sa zone proximale de développement (tableau annexe 6g).

  Exemples : L'expérience des feuilles amoureuses, de manière générale, entraîne ce type de situations, comme celle du ludion, plus ponctuellement : « *après l'eau ça y fait un peu plus dur et le vent il peut pas le tenir en haut, après ça descend* » (*63).

- *Observation 6.8.* Ainsi, la seule observation du phénomène contre-intuitif, même s'il s'agit d'une observation dirigée, n'est souvent pas suffisante pour induire son explication correcte et complète, notamment dans les cas où elle ne conduit qu'à la compréhension des aspects techniques de l'expérience. Cela ne l'empêche pas d'être conservée (stockée) par l'apprenant, qui semble alors souvent démuni et perdu, voire démotivé. Aux cas ci-dessus s'ajoutent dès lors les entretiens du tableau annexe 6h.

Exemple : Ainsi dans l'entretien *28, le garçon accepte le résultat, tout en affirmant qu'il voit la boule de pétanque arriver la première à cause de son aspect métallique qui attire son œil.

- *Observation 6.9.* Dans chacun de ces cas, aucun apprentissage n'est possible, la contre-intuitivité ne peut pas être dépassée et l'interprétation correcte ne peut pas être élaborée. Toutefois dans de rares cas, et notamment parce que les questionnements préalable et postérieur à l'expérimentation s'apparentent souvent déjà à des interventions didactiques auprès de l'apprenant, il peut y avoir un apprentissage. Ces événements faussent l'observation didactique mais n'infirment pas pour autant la prédiction testée (tableau annexe 6i).

  Exemple : Dans l'entretien *36, après l'échange avec le chercheur, il ressort selon l'enfant que « *cette boule elle va vite parce qu'il est lourd et celle-là elle va vite parce qu'il est léger. C'est tout la même chose parce que celle-là elle est légère et que des fois les légères elles peuvent aller plus vite* ».

8.2.2.7. Validation de la prédiction 7 : risques et effets néfastes

Prédiction 7 : Dans le cas où la contre-intuitivité s'exprime mais où le phénomène mis en œuvre n'est pas spontanément compris par l'apprenant, ce type d'expérience est en outre susceptible d'avoir divers effets néfastes sur l'apprentissage, en contribuant notamment : au découragement vis-à-vis du sujet ou de la discipline, au renforcement des conceptions initiales, à la création de nouvelles conceptions et métaconceptions erronées, à l'adoption d'heuristiques inadéquates, voire à la destruction de conceptions initialement correctes.

- *Observation 7.1.* Les enregistrements des entretiens mettent en évidence un recours fréquent à des conceptions erronées complémentaires, qui viennent étayer la conception perturbée par l'expérience. La création de nouveaux liens entre conceptions semble en outre conduire à leur stabilisation. Dans d'autres cas, ces conceptions erronées sont même créées spontanément (tableau annexe 7a).

  Exemples : Le cas le plus significatif et déjà évoqué plus haut, est celui de l'entretien *1 qui conduisit à l'idée selon laquelle « *la laine, c'est fait avec de l'aluminium* ». Dans l'entretien *69, l'expérience des feuilles amoureuses est quant à elle expliquée par la similitude des matériaux entre les deux feuilles.

- *Observation 7.2.* Enfin, il arrive que la perturbation soit tellement forte que les conceptions initiales, peu solides bien que correctes, soient détruites pour ne pas être remplacées. Là encore, l'apprenant semble totalement démuni et perdu, démotivé souvent (tableau annexe 7b).

  Exemples : Suite à l'observation de la course des balles, une dame en déduit que « *L'attirance de la Terre reste la même pour n'importe quel poids* ». Un autre participant, dont les idées initiales étaient pourtant confuses mais pas incorrectes, suggère quant à lui : « *J'aurais tendance à dire qu'en fin de compte c'est une question de positionnement par rapport à l'espace, de hauteur de la chute, peut-être que la hauteur est plus significative que l'attraction terrestre…* ».

- *Observation 7.3.* Dans les cas, relevant du tableau annexe 7b, où les participants invoquent le fait que « le sèche-cheveux aspire » pour interpréter l'expérience des feuilles amoureuses, on reportera plutôt la responsabilité sur le dispositif (et la manière de poser le problème posé)… conception fausse certes, mais hélas ensuite confirmée par l'expérience, comme dans l'histoire de Mafalda présentée à la figure 68. Cet exemple met en évidence un biais insoupçonné de l'expérience contre-intuitive : la manière dont elle est présentée et les détails du dispositif mis en œuvre peuvent induire des conceptions fausses qui peuvent à leur tour être confortées par la manipulation.

- *Observation 7.4.* Ces cas se retrouvent particulièrement dans les expériences inaccessibles d'un point de vue théorique pour les apprenants. On observe alors des conceptions plus fausses et davantage de gens perdus (tableau annexe 7c).

  Exemples : Dans l'entretien *54a, l'enfant finit par se construire une interprétation du ludion fondée sur le principe de la montgolfière, pourtant totalement étranger à l'expérience. Bien entendu, on pourrait également ré-évoquer ici l'entretien *1 cité au début du paragraphe.

8.2.2.8. Validation de la prédiction 8 : accompagnement

Prédiction 8 : Au-delà de l'adéquation au cadre de référence, de la mise en contexte et d'un questionnement pertinent préalable à l'expérience, plusieurs paramètres sont nécessaires pour qu'elle soit non seulement systématiquement contre-intuitive, mais encore pour que l'information perturbatrice ne soit pas éludée, ne conduise ni à un ancrage ni à la création de conceptions fausses, et qu'elle participe ainsi d'un réel apprentissage : identification des conceptions initiales, vérification du cadre de référence et de la zone proximale de développement, accompagnement tout au long de l'expérience, décomposition des étapes pour faciliter la compréhension, dédramatisation de la difficulté, orientation vers l'utilisation des bons schèmes, aide à la construction et à la stabilisation des nouveaux, aménagement d'un temps d'échange et de réflexion suffisant, incitation à une réflexion métacognitive sur l'ensemble du processus.

- *Observation 8.1.* Cette dernière prédiction consiste en effet à stipuler qu'il existe des compléments au questionnement préalable susceptibles de procurer une efficience optimale à l'usage de l'expérience contre-intuitive. La recherche préliminaire n'ayant pas été conçue pour y répondre, à l'inverse de la recherche d'approfondissement ultérieure, quelques exemples confortent toutefois l'idée sous-tendue par le modèle allostérique : un accompagnement (par interventions didactiques) de l'apprenant est nécessaire (et parfois suffisant) pour lui permettre de comprendre les enjeux de l'expérience, pour accompagner la naissance de la contre-intuitivité et enfin, pour lui permettre de tirer profit de la perturbation qu'il a subie, en transformant ses conceptions dans le sens prévu par le médiateur ou l'enseignant (tableau annexe 8a).

  Exemple : Dans l'expérience du ludion, l'accompagnement par le chercheur, et notamment l'aide à l'observation du mouvement du niveau d'eau dans la pipette, permet souvent à l'enfant (comme dans l'entretien *49) de comprendre l'idée selon laquelle « *quand on presse ça devient plus lourd, alors ça coule* ».

- *Observation 8.2.* Ce pourrait par exemple être le cas lorsqu'un détail du matériel ou de la situation perturbe clairement l'apprenant (nature de la boule de métal, rebond des balles, trombones, microbulles…). Les cas correspondants ont été cités dans le traitement de la prédiction 2.

- *Observation 8.3.* C'est également le cas lorsque les observations ne sont pas réalisées dans de bonnes conditions, leurs résultats détournés ou rejetés, des conceptions correctes mises à mal et abandonnées par l'apprenant, des conceptions fausses créées… Autant de cas cités dans en relation avec le traitement des prédictions 2 et 3.

- *Observation 8.4.* C'est enfin le cas lorsque l'expérience est de type « expérience impossible » et que l'apprenant ne parvient pas à relever le défi qui lui est proposé. Il est alors nécessaire pour le médiateur de lui montrer la solution et on retrouve la nécessité d'un questionnement à propos de ce qui a été mis en évidence (tableau annexe 8b).

  Exemples : Cette observation se manifeste en particulier dans l'expérience du ludion et des feuilles amoureuses, à de nombreuses occasions.

- *Observation 8.5.* Dans ces cas-là, il faudrait être capable d'accompagner, c'est-à-dire de proposer des variantes aux manipulations, de procéder à des observations dirigées, d'imaginer des prolongements expérimentaux et des questionnements complémentaires pour guider l'apprenant vers des conceptions non seulement plus fiables, mais également plus justes.

8.2.2.9. Résultats complémentaires

Diverses autres observations émanent de cette recherche préliminaire, bien qu'elle n'ait pas été conçue pour les mettre en évidence spécifiquement. Il est intéressant de les évoquer.

- *Observation 9.1.* Les conceptions varient peu en fonction de l'âge des apprenants. Les adultes ont simplement plus de « théories ingénues » à invoquer lorsque leurs idées sont mises en défaut ; elles sont souvent inspirées (de manière inappropriée) par les restes de leurs connaissances scientifiques scolaires. Les conceptions correspondantes ne sont pas nécessairement plus solides,

mais plus nombreuses. On peut dire que de manière paradoxale, plus leurs connaissances sont nombreuses (sans être spécialisées), plus nombreuses sont les théories inappropriées, ce qui est compatible avec le modèle-cadre SRK (tableau annexe 9a).

Exemples : Cette observation est particulièrement manifeste dans les entretiens *3, *29b, *48 ou *70 : « *le souffle n'est pas partout le même à un moment donné, ce qui fait qu'il y un frottement d'un côté, il y a un frottement de l'autre côté (…) comme l'air qui devrait sortir tourne, c'est celui-là qui frotte et ainsi de suite* ».

Notons qu'un nombre beaucoup plus important d'enfants que d'adultes a été auditionné, d'où les nombres équivalents d'exemples chez les adultes et les enfants.

- *Observation 9.2.* Mieux encore, on observe une volubilité beaucoup plus importante et des conceptions beaucoup plus erronées (à moins qu'il ne s'agisse d'une plus grande accessibilité des conceptions erronées du fait de cette volubilité) chez les adultes qui ont reçu une formation scientifique, ont conservé des souvenirs d'école ou se disent aimer la science. Seuls ceux qui ont réellement « pratiqué » la science ont des réponses correctes (tableau annexe 9b).

  Exemple : L'entretien *3 est en ce sens assez significatif : « *Parce que entre la laine et l'aluminium, il y a une différence génétique relativement faible (réponse pas vraiment sérieuse). Pas des gènes mais des molécules on va dire qui réagissent à peu près de la même façon* ».

- *Observation 9.3.* Nombre de participants adultes tentent en outre de se référer à leurs souvenirs d'école (par des réponses du type : « *Ah oui, je me souviens qu'on avait vu ça, je devrais m'en souvenir… je ne sais plus trop* ») et finissent par abandonner, au lieu de se reposer sur leur observation, leur sens commun et leur logique. A l'inverse, les enfants sont souvent plus décomplexés. Cela en dit long sur l'image dogmatique et normative que la science donne d'elle même au citoyen à travers l'éducation scientifique qu'il reçoit.

- *Observation 9.4.* La présentation des expériences telle qu'elle a été faite dans cet atelier de la *Fête de la Science* 2002 présente plusieurs intérêts : motivation liée aux défis, pour lesquels l'effort est valorisé par les diplômes ; aspect ludique lié à la nature des expériences et à leur présentation en loges ; aspect spectaculaire et perturbateur lié à la contre-intuitivité ; expérience conçues pour donner du sens aux problèmes posés, par l'absence de boîtes noires et l'utilisation de matériel courant ; mise en confiance du public grâce à l'isolement dans les loges qui les protègent du regard des autres et des animateurs, leur permettant de se livrer à des essais même farfelus, en toute liberté… autant de paramètres à garder à l'esprit pour un bon usage des expériences contre-intuitives.

- *Observation 9.5.* La présence des parents est à proscrire pour éviter qu'ils ne donnent les « réponses » (souvent fausses au demeurant) à leurs enfants. C'est pourquoi ce type d'atelier est toujours réalisé pour des publics homogènes, et jamais familiaux. On ne peut certes pas reprocher aux parents de vouloir expliquer ce qu'ils comprennent à leurs enfants ; la « rencontre pédagogique et intelligente » constitue même une des motivations principales des visiteurs de musées. Inutile alors de les mettre en situation d'erreur face à des expériences conçues pour cela (tableau annexe 9c) !

  Exemple : Dans l'entretien *55, c'est la maman qui donne une réponse à moitié fausse à l'enfant, qui la répète : « *Parce que ça enlève de l'air, ça se remplace par de l'eau pis ça devient plus lourd* ».

- *Observation 9.6.* Le questionnement préalable est insuffisant (voire néfaste) à la mobilisation des conceptions ciblées par l'expérience contre-intuitive s'il ne porte pas précisément sur les phénomènes mis en œuvre. L'apprenant ne peut alors en effet se faire aucune idée de la manipulation à effectuer, du résultat à venir ou du degré de réflexion que l'on attend de lui ; il ne peut donc pas mobiliser et formuler préalablement les conceptions supposées être perturbées par l'expérience contre-intuitive. Les entretiens de type 2 s'apparentent alors aux entretiens de type 1. On se heurte particulièrement à cet écueil dans les expériences contre-intuitives de type « expériences impossibles » où le questionnement est proposé sous forme de défi expérimental et non de prévision du résultat d'une expérience donnée (tableau annexe 9d).

8.2.2.10 Apports et limites de la recherche préliminaire

De manière très satisfaisante, on constate que cette recherche préliminaire a permis de valider l'ensemble des prédictions théoriques formulées à partir du modèle allostérique formalisé, à partir de cas concrets parfois certes peu nombreux, mais sans qu'aucune observation ne vienne à l'inverse les invalider. Quelques difficultés, liées à la méthodologie même de la recherche, ont toutefois pu être mises en évidence. Elles sont répertoriées ci-dessous.

- Le fait de savoir que l'expérience va être contre-intuitive modifie le rapport de l'apprenant à l'expérience en lui faisant soupçonner un résultat contraire à celui auquel il s'attend, d'où des réponses parfois peu fiables du point de vue de la recherche. La solution consiste à ne pas évoquer le terme « contre-intuitivité » devant les participants, qui se doutent toutefois souvent que si la question est posée, c'est qu'il peut y a voir un piège.
- L'absence de suivi des apprenants après l'expérience contre-intuitive ne permet pas de connaître le devenir à long terme des conceptions perturbées ou introduites. Un défaut qui sera corrigé dans la recherche d'approfondissement grâce au post-test.
- Comme nous l'avons évoqué plus haut, les questionnements préalable et postérieur à l'expérimentation peuvent dans bien des cas s'apparenter à une intervention didactique (ou « accompagnement »), rendant en apparence les expériences proposées plus aptes à susciter l'étonnement et à faire évoluer les conceptions des apprenants qu'elles ne le sont réellement.
- De par la nature même des expériences de type « expériences impossibles » et dans la mesure où la recherche est restée fidèle à la manière dont elles sont présentées en général dans l'atelier des *Atomes Crochus*, le questionnement préalable n'a pas pu porter sur les interrogations susceptibles de faire émerger les conceptions initiales des apprenants dans l'expérience du ludion (et dans une moindre mesure dans l'expérience des feuilles amoureuses). La question aurait en effet du être : « *Que se passera-t-il si on appuie sur la bouteille ?* ». D'où l'observation de peu de différences entre les deux types d'entretiens dans ces deux expériences.
- Les explications qui émergent sont parfois très hésitantes et hasardeuses ; à ce titre, du point de vue de la recherche didactique, elles ne correspondent peut-être pas toutes à de réelles « conceptions », au sens d'idées et de raisonnements bien ancrés au sein de systèmes explicatifs.
- La recherche ayant été menée dans des conditions telles que les participants ont en général peu de temps à consacrer à l'animation (ils souhaitent en visiter beaucoup d'autres lors de fêtes de science telles que celle-ci), ils sont souvent en *contrôle cinétique* ; il s'agit d'un point fort de la recherche pour mettre en évidence les *biais cognitifs*, mais pas observer leurs apprentissages. La recherche d'approfondissement a par suite été conçue pour corriger ces biais expérimentaux.

8.2.3. Recherche d'approfondissement (2003-2004)

Destinée à approfondir certaines des observations et des analyses réalisées dans la recherche préliminaire, cette recherche portait, à l'inverse de la précédente, sur des enfants d'âge scolaire, en temps moins limité pour qu'ils ne soient plus sous *contrôle cinétique*, sur un nombre d'expériences restreint et bénéficiait d'un *post-test* destiné à évaluer la qualité des apprentissages en fonctions des conditions de réalisation des expériences contre-intuitives. Les résultats, en sont présentés ci-dessous de manière synthétique, les exemples les plus significatifs étant reportés avec précision. L'ensemble des observations est toutefois détaillé dans les annexes *12.2.2.2. Recherche d'approfondissement : pré-test (2003)* et *12.2.3. Recherche d'approfondissement : post-test (2004)*.

Trois types d'enseignements de cette recherche se distinguent et sont reportés dans trois paragraphes différents : le premier porte sur les conditions de mise en œuvre de l'expérience contre-intuitive, déjà évoquées dans la recherche préliminaire et liées aux prédictions 1 à 4 ; le second, lié aux prédictions 6 et 7, porte sur la mise en évidence de non-apprentissages, voire de mauvais apprentissages consécutifs

à la réalisation des expériences ; le troisième, relatif à la prédiction 8, met en évidence les cas d'apprentissages facilités par la compréhension des phénomènes mis en œuvre par ces expériences. La prédiction 5, portant sur l'influence du questionnement préalable à l'expérimentation, a été intégralement traitée dans la recherche préliminaire ; nous n'y reviendrons pas.

8.2.3.1. Effets de contexte et de mise en œuvre (prédictions 1-4)

Mis en évidence dans la recherche préliminaire, le rôle des conceptions initiales devait néanmoins être revisité, de manière à comprendre comment elles émergeaient, pourquoi et sous quelle forme, et surtout si ce qui était exprimé correspondait véritablement à des conceptions bien ancrées ou à des hypothèses lancées par les enfants pour les tester.

- Affordance et réflexes heuristiques

- Dans l'expérience des « feuilles amoureuses », le matériel expérimental a induit de manière très forte la réflexion des enfants. Et c'est sans beaucoup d'hésitations que 11 enfants sur 12 proposent d'emblée de poser le sèche-cheveux coiffé du carton sur l'autre carton. Il est probable, dans le cas présent, que le dispositif expérimental influence la manière de réaliser l'expérience, par une sorte d'*affordance* imprévue de l'objet présenté. Mais cette capacité d'un objet à induire la manière de l'utiliser repose elle-même sur des conceptions d'orientation, qui interprètent sa forme pour en déduire son usage. L'observation illustre donc l'utilisation d'un réflexe comportemental de type S.

  Cet exemple illustre clairement la difficulté de faire émerger et expliciter les conceptions. En effet, pour savoir si l'idée qu'un « sèche-cheveux aspire de l'air » est réellement une conception initiale, il aurait fallu interroger les enfants sur cette question face à un sèche-cheveux non « habillé ».
- Dès lors, l'expérience perd toute sa contre-intuitivité, car aucune réflexion préalable n'a lieu. Pour pallier à ce problème, le chercheur a demandé, avant la réalisation de l'expérience, pourquoi ils pensaient que le carton allait « tenir » sur le sèche-cheveux. Tous les enfants ont répondu « *parce que le sèche-cheveux aspire l'air* ». Comme cela a été évoqué plus haut, il est possible d'imaginer bien des interprétations à cet état de fait : confusion entre les termes d'aspirer et souffler, conception d'un sèche-cheveux qui « aspire » l'eau quand on se sèche les cheveux, interprétation d'un « dispositif scientifique » où le sèche-cheveux aurait été modifié pour l'occasion ou, plus simplement, reconstruction mentale de la situation pour donner une cohérence à leur solution, très intuitive. Mais plus sûrement, il est possible d'interpréter cette observation par la prolongation du réflexe comportemental évoqué ci-dessus en un réflexe cognitif qui vient le confirmer, toujours en mode S, l'heuristique conduisant vers la conception selon laquelle « le sèche-cheveux souffle l'air » étant accessible depuis les conceptions d'orientation qui avaient induit le geste initial.

  Ce réflexe cognitif est très similaire aux réponses, maintes fois décrites dans le corps de ce texte, aux questions portant sur la forme du croissant de Lune, de ce que boit la vache ou de la composition de la laine. Elles correspondent à des heuristiques improbables, mais qu'il faudra néanmoins apprendre à inhiber. Le post-test nous permettra de mettre en évidence cette possibilité.

- Effet du contrôle cinétique sur $\Phi_{affin}(\tilde{\imath})$ et $\Psi_{cog}(\tilde{\imath})$

- Par ailleurs, si certains enfants revenaient facilement sur cette première explication, il a parfois fallu que le chercheur « prouve » que le sèche-cheveux soufflait de l'air, en le dirigeant vers leur visage, complétant cette démonstration par la question : « *Un sèche-cheveux, alors, c'est comme un aspirateur ?* ». L'objectif de cette dénégation consistait à tester la capacité de la contre-intuitivité de l'expérience à empêcher les enfants de corriger leur confusion. Car en effet, dans ce cas précis, l'information procurée par l'expérience est tellement étonnante que, pour se stabiliser, elle a besoin

de s'insérer immédiatement dans un cadre de savoir dont la pertinence n'est pas nécessairement évaluée tout de suite par l'enfant ; ce dernier, en effet, doit parer au plus pressé en diminuant la valeur de la fonction $\Phi_{affin}(\tilde{\imath})$. Ce n'est que revenu en contrôle thermodynamique que le savoir pourra commencer à se réorganiser, laissant à l'enfant la possibilité d'abandonner son interprétation erronée pour construire éventuellement un schème plus adapté, s'il en a les moyen, conduisant à une stabilité accrue, mais cette fois de $\Psi_{cog}(\tilde{\imath})$. Le post-test devrait également nous permettre de le vérifier.

Si la remise en question de l'interprétation erronée a bien eu lieu suite à l'intervention du chercheur, elle n'a pas pour autant fondamentalement perturbé le raisonnement des enfants, puisque seuls 4 (*74, *76b, *83b, *99) sont revenus sur leur prédiction alors que, bien qu'ils aient constaté que le sèche-cheveux soufflait de l'air, 7 enfants (*72, *75a, *75b, *76a, *84a, *84b, *84c) l'ont tout de même d'emblée posé sur la feuille de carton. Cette observation constitue une nouvelle manifestation de la forte affordance du dispositif expérimental, mais aussi peut-être un effet métacognitif, l'enfant se disant que, puisqu'on lui demande de réaliser l'expérience, elle doit être possible en dépit des apparences. Un seul enfant n'a eu aucune idée, ni aucune proposition pour répondre au défi proposé, quand bien même il semblait parfaitement comprendre la question posée.

- Ainsi, dans cette expérience des « feuilles amoureuses », l'idée d'un sèche-cheveux aspirant de l'air est avant tout un obstacle dans le sens où, l'expérience n'étant plus contre-intuitive, la réponse paraît logique et aucun apprentissage ne peut être espéré : l'apprenant reste « bloqué » dans une vallée locale d'énergie potentielle de la fonction $\Phi_{affin}(\tilde{\imath})$. L'effet « outil didactique » de l'expérience contre-intuitive n'apparaît donc qu'avec un accompagnement offrant à l'apprenant la possibilité de remettre en question cette première explication, et uniquement pour lui faire prendre conscience des limites de son intuition.

  On retrouve l'importance du contexte sur le degré de contre-intuitivité (ici, en l'occurrence, le contexte de l'expérience qui l'anihile), ainsi que de l'accompagnement de l'apprenant pour l'aider à corriger tous les biais possibles, dont certains ne sont pas du tout intuitifs pour le chercheur ou l'enseignant. Cet accompagnement s'apparente à l'effet catalyse décrit dans notre partie théorique : parce que l'apprentissage spontané du mécanisme physique par lequel opère le phénomène est impossible, l'adulte accompagne l'enfant dans des vallées de compréhension successives, dont les barrières d'activation pour passer de l'une à l'autre ne sont pas trop élevées.

  - Cadre de référence et mode K

- Dans le cas du « ludion », on observe des conceptions plus diversifiées. En premier lieu, pour une majorité d'enfants (10 sur 12), la présence d'air à l'intérieur du ludion est identifiée sans ambiguïté. Néanmoins, « air » et « vide » semblent être confondus dans leurs explications et ils argumentent par une idée d'aspiration de l'eau par l'air. « *Quand on presse, comme ça, ça tire l'eau dedans. Après, l'eau ça y fait un peu plus lourd et le vent il peut pas le tenir en haut, après ça descend* (*63a) » ou « *c'est comme un petit peu dedans que ça aspire* » (*52a). Cette conception peut constituer un obstacle très fort, car elle procure un système explicatif tout à fait performant dans la situation présente.
- D'une manière générale, la présence de l'air dans la partie supérieure du ludion est très perturbante. Certains enfants ont de la peine à distinguer si ce qu'ils observent en termes de changements de niveau correspond à de l'eau ou à de l'air. Ainsi, sur les 9 enfants sur 12 qui mentionnent sa présence, seuls 2 (*62b, *99) s'en détachent pour n'observer que la montée de l'eau et donner directement une explication relative à l'augmentation du poids du ludion. Pour 7 enfants, la première réaction, juste après la démonstration, c'est que « *l'air descend* » (*51) ou qu'il « *doit descendre sinon il ne peut pas sortir* » (*49). Cette conception empêche une observation pertinente

de ce qui se passe réellement entre l'eau et l'air. « *Dedans, il y a un petit peu d'eau, mais il y a aussi de l'oxygène… de l'air* (*52b) » explique cet enfant, sans toutefois pouvoir aller plus loin dans son observation.

- La présence des bulles est également perturbatrice (*62c). C'est le cas de (*62a) qui propose que « *ça fait des molécules* » en montrant les bulles sans pouvoir expliquer quoi que ce soit. Au-delà du fait que les enfants utilisent volontiers des mots qui « font scientifiques » sans pour autant en maîtriser le sens, cette réponse donne également une information sur la conception qu'a cet enfant des molécules. Un enfant va même affirmer « *qu'il y a du sel* (*52a) » dans l'eau, prenant les bulles pour preuve. Il aurait été intéressant de le questionner pour voir si cette hypothèse provenait d'une connaissance sur l'augmentation de la densité de l'eau salée.

  Ces observations sont manifestes d'une réflexion en mode K, simplement parce que les notions nécessaires sont loin du cadre de référence habituel de l'enfant, bien que pas extérieures à sa zone proximale de développement.

- <u>Rôle de filtre des conceptions</u>

Ainsi, au delà de leur rôle d'outil et d'obstacle, les conceptions de toutes natures (méta ou non) jouent effectivement le rôle de filtre décrit par le modèle allostérique, et en particulier lorsque l'observation nécessaire pour comprendre le phénomène est déconnectée du cadre de référence des enfants. Comme ces exemples le prouvent, ce filtre peut être tellement fort qu'il parvient à déformer jusqu'à l'observation même de la réalité. Dans ces cas, il serait dès lors difficile d'observer des apprentissages profonds.

8.2.3.2. Manifestations de non apprentissage (prédictions 6-7)

Mis en évidence dans la recherche préliminaire, nombreux sont les cas de non-apprentissage consécutifs à l'observation ou la réalisation d'une expérience contre-intuitive. La recherche d'approfondissement revient sur ses manifestations pour les confirmer. La plupart d'entre elles n'apparaissent qu'au moment du post-test ; néanmoins, certains symptômes sont déjà identifiables au moment du pré-test.

Parmi les trois expériences conservées dans la recherche d'approfondissement, celle de la « course des balles », qui reprend l'expérience dite « de Galilée », est certainement la plus contre-intuitive. Un premier constat est que l'expérience réalisée seule étonne (4 sur 12 : *30, *32, *33, *99), mais ne permet pas d'interprétation du résultat (5 enfants sur 12 ne donnent aucune explication de ce résultat contradictoire à leur conception : *30, *32, *33, *39, *99). Et pour cause : l'interprétation est complexe, nécessite des notions de physique élaborées, et ne se situe donc pas dans la zone proximale de développement de ces enfants. Deux catégories de cas se présentent alors.

- <u>Adaptation de l'interprétation à la conception initiale</u>

- Le premier est similaire aux effets de contextes évoqués ci-dessus : en mode K, l'enfant fait appel à une interprétation spontanée, irréfléchie, à laquelle il « accroche » l'information reçue. Au cours du pré-test, par exemple, l'un d'entre eux (*45) prend comme référence la fusée « *qui va très vite* » pour expliquer que la boule de pétanque atteindra le sol plus vite. Ce faisant, il associe le poids à la vitesse, sans tenir compte de la présence ou non d'un moyen de propulsion.
- D'autres exemples ont déjà été donnés en relation avec l'expérience du ludion. En effet, l'utilisation de la présence des bulles ou de « l'air qui aspire » pour interpréter le résultat lors du pré-test constitue également une adaptation de l'interprétation à la conception initiale selon laquelle « l'air doit descendre » pour s'échapper de la bouteille.

- Déformation ou rejet de l'information

Dans la seconde catégorie de cas, quand une explication est donnée, c'est l'information qui est déformée pour correspondre aux conceptions initiales, en l'occurrence que l'une des deux balles arrivera en premier au sol : 9 enfants sur 12 pensent que la boule de pétanque arrivera en premier parce qu'elle est plus lourde, 2 enfants pensent le contraire et 1 enfant, ayant déjà vu l'expérience à la télévision, se souvient qu'elles arrivent en même temps. Un résultat conforme à nos prévisions théoriques dans l'analyse de la fonction $\Psi_{cog}(\tilde{\imath})$ qui, rappelons-le, possède deux composantes qui décrivent respectivement la stabilité du lien information-savoir et la stabilité du savoir en transformation lui-même : $\Psi_{cog}(\tilde{\imath}, x_1, x_2, \ldots, x_n, \alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_p) = \Phi_{affin}(\tilde{\imath}, x_1, x_2, \ldots, x_n, \alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_p) + \Phi_{réorg}(\alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_p)$.

- Un autre exemple très intéressant est donné par l'expérience des « feuilles amoureuses ». Durant le post-test, un enfant (*84b) déforme son « souvenir » du résultat pour l'adapter au fait que de l'air est expulsé du sèche-cheveux. Il affirme donc que le carton tenait dessus… mais à une certaine hauteur. Cet exemple illustre parfaitement la manière dont une information peut être déformée (ici dans un souvenir) pour rester en cohérence avec une conception. En l'occurrence, le fait que cet enfant ait pris conscience du fait que le sèche-cheveux souffle de l'air rend pour lui impossible le fait que le carton reste « collé » au sèche-cheveux. Un constat d'autant plus étonnant que, lors du pré-test, une explication relative aux turbulences de l'air à la sortie du sèche-cheveux faisait penser que cet enfant serait en mesure de comprendre une explication plus élaborée. C'était sans tenir compte du fait que cette explication n'avait qu'un seul but : rendre compatible la réalité avec son intuition de départ, à savoir que le sèche-cheveux aspire l'air.
- Enfin, lorsque l'expérience est trop contre-intuitive, ou du moins lorsque la conception initiale est extrêmement prégnante, l'analyse des entretiens montre parfois un rejet pur et simple de l'information (3 sur 12 : *32, *33a, *45), tant lors du pré-test que du post-test. Un rejet qui peut apparaître au niveau de l'observation même de l'expérience. Dans l'expérience de la « course des balles », lors du pré-test, 2 enfants (*34a, *34b) n'arrivaient pas à « voir » que les deux balles touchaient le sol simultanément, et ce malgré de multiples répétitions de l'expérience et l'intervention d'autres enfants « témoins » qui tentaient de le leur faire visualiser. Ce rejet du résultat de l'expérience se retrouve également dans le souvenir de deux autres enfants (*32, *45).

- Caractère opératoire et stabilité du savoir

Ce rejet peut également être observé a posteriori, en dépit de la transformation de la conception initiale lors de la réalisation de l'expérience. Ainsi, deux enfants (*39a, *45) avaient très justement constaté l'arrivée simultanée des balles, mais au post-test, ils étaient tous deux revenus à leur conception initiale d'une boule de pétanque allant plus vite parce que plus lourde. Un élément qui valide particulièrement bien l'idée selon laquelle l'expérience contre-intuitive, même si son résultat a été identifié, ne conduit pas nécessairement à un apprentissage, la conception initiale pouvant facilement refaire surface après quelque temps si elle « semble » simplement plus opératoire.

- Souplesse du savoir et influence des pairs

Un enfant (*34a) ayant anticipé le résultat lors du pré-test de la course des balles en mentionnant la balle de tennis comme étant la plus rapide, « *parce qu'elle est plus légère* », a très clairement modifié sa position sous l'influence de son binôme, affirmant que ce serait la boule de pétanque « *parce qu'elle est plus lourde* ». On peut supposer que cette faible confiance dans sa conception initiale explique la facilité avec laquelle il a finalement transformé sa conception mais, de manière plus intéressante, la conception initiale de son binôme se retrouve par contre dans le post-test. Il affirme en effet qu'il se « *rappelle que c'est la boule de pétanque qui arrive la première* » et sa position ne changera pas, même après l'expérience. Cette observation illustre particulièrement bien l'effet de consensus que peuvent

avoir les opinions des pairs sur la stabilisation des conceptions, qu'elles soient vraies ou fausses, opératoires ou non.

- Insuffisance de l'inhibition d'heuristiques fausses

Dans l'expérience des « feuilles amoureuses », trois enfants (*75a, *75b, *76a) interrogés en entretien de type I pensaient lors du pré-test que le sèche-cheveux aspirait et ils ont été surpris de constater, alors qu'ils avaient réalisé qu'au contraire il chassait de l'air, que le carton restait tout de même en place « comme s'il était aspiré ». Pourtant, aucun de ces enfants ne s'est souvenu du geste à réaliser et aucun n'a pu formuler de proposition alors que tous, au pré-test, avaient pourtant spontanément posé le sèche-cheveux sur le carton. Cet état de fait peut s'expliquer par le fait que l'inhibition de l'heuristique fausse initiale (le sèche-cheveux souffle) ne se soit pas accompagnée de la construction d'une conception adaptée complémentaire et opératoire. Ce faisant, le mode K se trouve dépourvu de solution face à une information trop « décalée » par rapport au savoir de l'enfant.

Un an plus tard, un autre enfant (*84a) s'est souvenu qu'il fallait poser le sèche-cheveux sur le carton, mais ne comprenait plus comment il pouvait « tenir » puisque « l'air était soufflé ». Il donnait alors une explication relative à la présence des trombones. Dans un tel cas, l'enfant a bien inhibé l'heuristique erronée relative au fonctionnement du sèche-cheveux ; mais cette inhibition n'a pas été suffisante pour lui permettre d'aller plus loin. Il est donc revenu à une explication relative au rôle des trombones, explication qu'il avait déjà donnée au pré-test, alors couplée à l'idée d'un « sèche-cheveux aspirateur ».

- Oubli des nouveaux savoirs, faute de mobilisation

Ces résultats montrent également que, pour que les nouveaux schèmes de pensée deviennent opérationnels et qu'ils se stabilisent, il est nécessaire qu'ils soient souvent remobilisés. Un constat confirmé par l'exemple suivant. Dans le post-test de l'expérience des « feuilles amoureuses », un enfant, tout en ne se souvent plus du « truc », pense à poser le sèche-cheveux sur le carton. Puis, avant de réaliser son geste, il se ravise en prenant conscience du fait que l'air sort du sèche-cheveux (*83b). Puis il n'a plus d'autre idée. On peut s'étonner du peu de transformation de la conception initiale : en effet, lors du pré-test, cet enfant avait émis plusieurs hypothèses, portant notamment sur la présence des trombones, puis avait éliminé les moins pertinentes en observant de manière très fine l'écoulement de l'air entre les deux feuilles de carton. Ce premier travail aurait pu lui permettre de mémoriser le résultat de l'expérience, voire de comprendre l'explication donnée en groupe suite au pré-test. Mais faute d'avoir remobilisé l'expérience pendant plusieurs mois, il ne lui était rien resté de ses réflexions.

- Stabilisation de conceptions erronées

Une information, déformée pour s'adapter à un schème donné, peut venir le conforter en le rendant faussement plus opératoire. Cette stabilisation peut provenir du résultat de l'expérience elle-même. C'est le cas observé dans le défi des « feuilles amoureuses », à travers les évolutions de certains enfants ayant participé au pré-test de type II, c'est-à-dire sans anticipation préalable du résultat de l'expérience et sans possibilité de remettre en question leur conception d'un « sèche-cheveux aspirateur ». Tous trouvent alors « normal » que le carton tienne sur le sèche-cheveux puisqu'il aspire. Le résultat obtenu renforce donc encore cette conception initiale d'un sèche-cheveux qui aspirerait. Et de fait, 2 enfants continuent, lors du post-test, à donner une explication selon laquelle le sèche-cheveux aspire (*74, *84c). L'expérience a donc contribué à ancrer une conception initiale erronée.

En termes énergétique, le processus est le suivant : l'information, trop étrangère au savoir existant qui, même en mode K ne peut s'organiser pour la traiter, est déformée pour s'adapter à un « bricolage » cognitif spontané, ce qui a pour effet d'abaisser $\Phi_{affin}(\tilde{\imath})$. Puis l'information déformée est intégrée au

savoir ; $\Phi_{affin}(\tilde{\imath})$ s'annule puisque l'information libre disparaît, mais c'est $\Phi_{réorg}(\alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_p)$ qui est stabilisée, au niveau d'une vallée correspondant à un schème qui repose désormais sur cette idée fausse. Schème qui pourra être réinvoqué ultérieurement, voire heureusement remise en cause si nécessaire.

8.2.3.3. Manifestations d'apprentissage (prédiction 8)

Les manifestations d'apprentissage peuvent prendre plusieurs formes pouvant aller jusqu'à une véritable compréhension du phénomène ou de l'information qui, alors, peuvent conduire à des explications scientifiquement correctes et être mobilisées à bon escient ultérieurement. La recherche d'approfondissement a toutefois permis de mettre en évidence deux statuts beaucoup plus ambigus. Le premier a été évoqué plus haut : il s'agit de l'inhibition d'heuristique ou de conceptions dont les enfants se souviennent qu'elles étaient erronées, mais qui n'offre pas de solution alternative. Le second relève d'une simple mémorisation de l'information, mais de manière non opératoire. D'un point de vue théorique, cela revient à « accrocher » l'information dans l'espace des conceptions, dans un pli cognitif parfois même disjoint des conceptions avec lesquelles elle entre en conflit ; un phénomène qui semble surtout se produire avec les expériences situées en dehors de la zone proximale de développement des enfants.

Pour ces enfants, on peut espérer que ces préapprentissages pourront être remobilisés plus tard, lorsque leur zone proximale de développement les aura englobés si les plis cognitifs concernés ne soient pas trop éloignés, pour construire des schèmes performants lors d'une future tâche en mode K par exemple.

- <u>Mémorisation de l'information</u>

Lorsque l'expérience est fortement contre-intuitive, comme c'est le cas de la « course des balles », le caractère spectaculaire qui en découle peut conduire à une mémorisation aisée du résultat, sans pour autant s'accompagner d'une véritable compréhension du phénomène. C'est le cas de l'enfant qui, avant le pré-test, connaissait le résultat pour l'avoir vu à la télévision, sans pour autant pouvoir en donner une explication. Au post-test, le résultat était toujours bien mémorisé, mais aucune explication supplémentaire ne venait l'étayer. Cette situation se retrouve chez 5 enfants (6 sur 12 en comptant le cas TV : *30, *33b, *34a, *44a, *44b, *99). Parmi ceux qui tentent une explication, on observe alors des approches triviales ou simplistes telles que « *Parce qu'elles partent en même temps pis elles tombent en même temps* (*34a) », ou : « *Parce qu'il y en a une qui est plus légère et l'autre qui est plus lourde* (*44a) ». Mais un début de compréhension semble parfois poindre dans les explications : « *Elles arrivent en même temps parce que la lourde elle descend plus vite et celle-là parce qu'elle est légère elle part plus vite* (*30) », ce qui n'est pas très loin de la vérité, cette dernière résidant dans le fait qu'en chute libre, l'inertie d'un objet compense exactement l'attraction qu'il subit, la masse d'inertie et la masse gravitationnelle étant exactement égales.

Il en va de même à chaque fois que le résultat est spectaculaire, ce qui relève des effets se produisant au *niveau émotionnel* évoqué à la section *6.7.6*. C'est le cas du ludion où 10 enfants sur 12 (dont 5 sans aucune hésitation) se souviennent du « truc » qui permet au ludion de descendre. Mais parmi eux, un enfant ne parvient plus, même après expérimentation, à en retrouver l'explication. « *Il y a de l'air qui monte… non, de l'eau pis ça fait descendre… je sais plus* (*49) ». Quant à l'expérience sur les « feuilles amoureuses » si 8 enfants sur 12 se souviennent du geste à réaliser, un seul n'en donne aucune explication.

Des apprentissages très relatifs, donc ; mais si nous faisons figurer les exemples qui suivent parmi les manifestations d'apprentissage, c'est parce qu'ils démontrent tout de même une certaine évolution.

- Solution trouvée en fonction de la nouvelle conception, compréhension

Parmi les trois expériences testées, celle dite du « ludion », bien que très complexe puisqu'elle fait appel à deux phénomènes physiques parallèles (la compressibilité des fluides et la poussée d'Archimède), était la plus susceptible d'entrer dans la zone proximale de développement des enfants ; c'est donc de celle-ci qu'il était possible d'attendre le plus en termes d'apprentissages.

Sans de véritables protocoles leur permettant de prendre conscience du premier de ces deux phénomènes, nous étions conscients que cet effet ne pourrait être appréhendé à travers l'expérience. Tout au plus espérions-nous qu'un questionnement apparaisse au moment de l'observation de la montée du liquide dans le ludion. Quant à la poussée d'Archimède, nous espérions parvenir à un niveau de formulation proche d'une assertion du type : « *parce que l'objet se remplit d'eau, il devient plus lourd et coule* ». Notre objectif était donc de voir si, partant d'une expérience inconnue, les enfants allaient pouvoir construire cette dernière connaissance à travers l'observation, l'ancrer à une connaissance plus générale du phénomène à travers l'expérience commune (un caillou jeté dans l'eau coule) et la reformuler comme telle. Quant aux compressibilités relatives des liquides et des gaz, mentionnées uniquement durant la phase d'accompagnement qui a suivi le pré-test, nous nous doutions qu'elles n'apparaîtraient pas de façon flagrante lors du post-test.

- Les observations enregistrées confirment la pertinence de ces objectifs. Si, comme pour l'expérience des feuilles amoureuses, c'est avant tout le « truc » qui marque l'esprit des enfants (10 enfants sur 12 s'en rappellent, dont 5 sans aucune hésitation), les réponses obtenues s'éloignent de la seule mémorisation d'information : sur les 8 enfants qui, au pré-test, déduisent par observation dirigée que « si l'eau entre dans le ludion, il devient plus lourd et coule » (*49, *51, *52a, *53a, *61b, *62b, *63a, *99), 7 conservent cette conception et l'expriment spontanément lors du post-test (*51, *52a, *53a, *61b, *62b, *63a, *99). Parmi eux, notons que 4 donnent cette explication avant même d'avoir refait l'expérience, alors que la manipulation est indispensable aux trois autres pour la « retrouver » (*52a, *61b, *63a).
- D'autre part, cette construction de connaissance a fait totalement disparaître du post-test les explications en liens avec des éléments périphériques tels que les bulles (*62c, *52a), les heuristiques qui s'activent au moment de leur observation ayant été totalement inhibées. On constate en revanche que la présence de l'air à l'intérieur du ludion reste souvent mentionnée, sans pour autant pouvoir dire qu'elle perturbe les explications.
- Un point manifeste réside tout de même dans le fait que 3 enfants ont retenu quelques éléments concernant la compressibilité des gaz, aspects abordés lors de l'explication de groupe, suite à la remarque faite par le chercheur : « *Vous me dites qu'il y a de l'air dans le ludion, mais alors, qu'est-ce qu'il devient, cet air, quand l'eau y entre ?* ». Des éléments de réponse se retrouvent dans des affirmations telles que « *c'est l'air qui pousse* ». Puis, questionné par le chercheur, l'enfant explique que « *quand on appuie, il y a de la pression* », avant de terminer sur « *l'eau monte et puisqu'il y a plus d'eau, l'objet descend* (*62a) ». Même observation chez cet enfant qui explique : « *Parce que là, il y de l'air un peu et pis quand on presse l'air, ça presse le petit machin qui est là-dedans en bas* ». Suite à la question « *Mais il y a de l'air où, dans la bouteille ?* » posée par le chercheur, l'enfant répond : « *Quand l'eau monte, et pis il presse l'air de plus en plus, et pis après au bout d'un moment il est obligé de descendre à cause de l'eau* (*99) ». L'explication la plus complète ou du moins la mieux intégrée semble toutefois être la suivante : « *parce que ça pousse l'air, y a l'eau qui monte et ça fait plus lourd donc ça descend* (*63a) ».
- Face à cette expérience, seuls 3 enfants n'ont pas réussi à se forger une conception juste mais seulement partielle du phénomène. Cette dernière remarque montre à quel point il est difficile pour des enfants d'appréhender des explications très éloignées de leur système de référence. De plus, l'enjeu de la question étant de pouvoir faire descendre le ludion, l'explication relative au poids de l'objet leur paraît toujours amplement suffisante. Un accompagnement plus conséquent serait dès

lors nécessaire pour que la perturbation introduite par la question du chercheur concernant le devenir de l'air au moment de la montée de l'eau puisse « compléter » cette première conception.

- Outre le passage d'une conception d'un « sèche-cheveux aspirateur » à celle d'un sèche-cheveux projetant de l'air, déjà considéré dans les paragraphes précédents comme une transformation de conceptions allant dans le sens d'un apprentissage, l'expérience des « feuilles amoureuses » offre quelques autres exemples d'apprentissages réussis. En effet, et bien qu'à l'issue du pré-test, l'explication relative à l'effet Venturi –présentée en des termes purement phénoménologiques (voir la sous-partie *9.3. L'approche phénoménologique des sciences*)– n'ait pas été plus conséquente que celles relative à la compression des liquides ou à la chute des balles, on constate que chez 3 enfants, un lien fort a été établi entre le fait que c'est justement parce que l'air est expulsé avec force et vitesse que le carton tient sur le sèche-cheveux. Parmi ces 3 réponses, notons que l'une d'entre elles reste très simplifiée : « *parce que ça bouche l'air* (*76a) », alors que les deux autres enfants ont un souvenir assez précis du phénomène, expliqué en groupe suite au pré-test : « *ça lui soufflait dessus (elle montre entre les deux cartons) et pis après l'air qui venait comme ça (elle montre l'air ambiant) ça le gardait couché (elle appuie sur le carton)* » (*72), « *ça tenait à cause de l'air, qui souffle pis après il s'éparpille, comme ça, pis après là il … ouais vous nous aviez expliqué que c'était un peu comme des petites graines et pis qu'elles voulaient toujours se rejoindre ensemble alors ça souffle, comme ça, pis celles-là elles revient (il montre l'air ambiant qui appuie sur le carton)* (*99) ».

Si le terme de pression n'apparaît pas dans ces explications, c'est que nous avions nous-mêmes renoncé à l'introduire dans nos explications phénoménologiques. Néanmoins, l'idée générale fait clairement ressortir cette notion.

8.2.3.4. Limites de la recherche d'approfondissement

Si les expériences choisies dans cette recherche d'approfondissement sont opportunément de trois types contre-intuitifs différents, on aurait pu les choisir de manière à ce qu'elles appartiennent davantage aux zones proximales de développement des enfants interrogés. En effet, parce que leurs interprétations étaient inaccessibles pour eux dans l'une (voire deux) d'entre elles (les « feuilles amoureuses », voire la « course des balles »), le protocole de recherche a surtout permis de mettre en évidence l'effet perturbateur de l'expérience contre-intuitive, l'importance du contexte dans lequel elle doit être réalisée et un ensemble d'obstacles se dressant devant les possibilités d'apprentissage par ce biais, mais moins les paramètres sur lesquels agir pour permettre, grâce à elle, un véritable apprentissage. Un choix un peu différent, pour une expérience au moins, aurait peut-être permis à cette recherche d'être plus instructive encore.

8.3. Synthèse et validation de l'hypothèse de recherche *H3*

Si la recherche préliminaire n'invalidait pas, voire confortait la plupart des prédictions théoriques formulées dans la sous-partie *8.1. L'expérience contre-intuitive à travers la théorie allostérique – Prévisions théoriques*, la recherche complémentaire a permis d'aller plus loin en approfondissant, sur quelques expériences bien ciblées, toute une série de cas représentatifs d'apprentissages et de non-apprentissages. Ce faisant, elle a confirmé les limites de l'expérience contre-intuitive qui avaient été prévues, sans jamais invalider elle non plus les prédictions initiales.

De ce point de vue, on peut considérer que notre troisième hypothèse de recherche *H3* a été validée à son tour ; non pas que tous les paramètres du modèle allostérique formalisé (et encore moins des environnements didactiques qui en dérivaient) aient été « prouvés », mais d'une part ils se sont montrés féconds et éclairants à l'égard d'une pratique pédagogique particulièrement répandue et efficace, lorsque ses conditions de réalisation sont bien maitrisées et contrôlées, et d'autre part ils ne semblent pas avoir été mis en défaut par des recherches expérimentales relatives à la mise en œuvre de plusieurs cas d'expériences contre-intuitives.

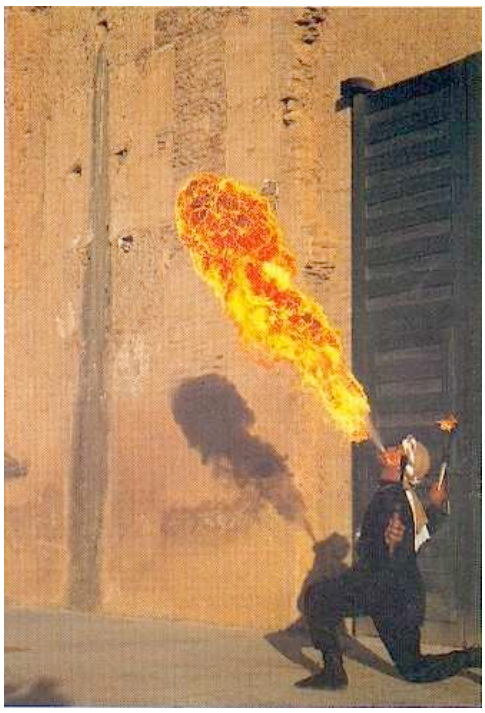


Figure 84 : « *Le feu a-t-il une ombre ?* », ou comment transformer une carte postale trouvée sur la place Dja mâa El-Fna (Marrakech) en outil pédagogique contre-intuitif.

Le modèle allostérique ayant été formalisé, et sa théorisation validée par l'expérience, il est désormais possible de rechercher d'autres applications et prévisions potentielles, issues de ses enseignements, à des fins de pédagogie ou de communication. C'est ce que nous avons entrepris dans la partie suivante, qui constitue une partie à la fois applicative et prospective. En particulier, de manière complémentaire à la validation expérimentale du modèle allostérique formalisé, les résultats de notre recherche permettent, grâce à la validation des prédictions initiales et aux observations diverses réalisées sur le terrain, de décrire quelques bonnes pratiques relatives à l'utilisation pédagogique de ces expériences. Elles sont résumées dans la sous-partie *9.2. Bonnes pratiques d'utilisation de l'expérience contre-intuitive*, au sein d'une partie plus générale décrivant quelques apports pédagogiques notables directement liés à l'approche allostérique que nous avons développée dans ce travail et constituant autant de situations où il serait encore possible de l'éprouver pour l'affiner.

9. APPLICATIONS ET PERSPECTIVES

« Les textes scolaires : il y en a beaucoup d'épelés mais peu de lus »
Frédéric Dard (1921-2000), écrivain français.

Le modèle allostérique et ses environnements didactiques sont bien entendu applicables à maints domaines et situations pédagogiques, médiationnelles ou communicationnelles. En tant que modèle d'apprentissage, il est à la fois susceptible d'éclairer des pratiques existantes en explicitant leurs avantages et limites, et de prévoir des applications nouvelles issues de certaines de ses prédictions. Nous proposons ci-dessous cinq volets relativement différents, portant indifféremment sur des approches de pédagogie et de vulgarisation des sciences, de médiation scientifique et de communication institutionnelle autour de questions faisant l'objet de controverses sociotechniques. Certains de ces volets sont ici simplement décrits, et renvoient à des articles que nous avons par ailleurs déjà publiés sur les sujets concernés.

9.1. Conseils aux enseignants pour une approche pédagogique « allostérique »

Indépendamment des environnements didactiques développés dans les parties précédentes, dont la lecture est peu aisée, il peut être intéressant d'en extraire les principales pistes pédagogiques qu'ils proposent, en les synthétisant sous la forme de « conseils » ou de « bonnes questions » à se poser face à une situation d'enseignement particulière. Nous en proposons ici quelques unes, directement utilisable par les enseignants :

- Sur quelles connaissances naïves de mes élèves puis-je m'appuyer, quelles sont celles que je vais devoir surmonter dans le cadre de l'enseignement que je prévois ?
- Quelles sont les conceptions initiales de mes élèves sur le sujet, et comment sont-elles structurées ? Avec quelle souplesse ? Quelles sont leurs conceptions clés de voûtes ?
- Mes élèves sont-ils dans une situation pédagogique favorisant le contrôle cinétique (où l'apprentissage est régi par les conceptions de contrôle et les heuristiques) ou le contrôle thermodynamique (où il est régi par la stabilité des conceptions) ?
- Si l'élève repond « faux », était-il en mode S, en mode R ou en mode K ?
- Quelles sont les conceptions de contrôle susceptibles d'interférer avec le sujet que j'enseigne ?
- Quels sont les biais cognitifs possibles ? Comment puis-je inhiber les heuristiques conduisant à ces biais cognitifs ?
- L'expression de telle conception erronée est-elle le signe de sa stabilisation intrinsèque ou est-elle stabilisée temporairement par une information mal interprétée ?
- Mes élèves disposent-ils de plis cognitifs disjoints, liés au thème enseigné, qu'il conviendrait de rapprocher ?
- Les apprentissages que j'ai prévus pour mes élèves leurs permettent-ils de bien gérer leurs charges cognitives ?
- Mon enseignement favorise-t-il la souplesse ou la rigidité des connaissances acquises par mes élèves ? Comment favoriser la souplesse de leur système de conceptions ?
- Les barrières d'activation que je leur demande de franchir ne sont-elles pas trop hautes ? Comment scinder les étapes pédagogiques pour les abaisser ?
- Puis-je convoquer un effet template ou un effet tunnel pour faciliter certains apprentissages ?

- Comment leur procurer l'*impulsion* nécessaire pour franchir ces barrières ? Puis-je leur donner accès à la visualisation préalable des conceptions vers lesquelles ils doivent tendre ?
- Pour m'assurer de la persistence des conceptions nouvellement acquises, ai-je bien prévu d'agir sur tous les paramètres favorisant leur stabilisation ? Puis-je imaginer des situations pédagogiques agissant à la fois sur le caractère opératoire, le consensus, la cohérence cognitive des nouveaux acquis ?

Pour plus de facilité, l'enseignant pourra par ailleurs garder à l'esprit la *typologie des processus d'apprentissage* que nous avons décrites dans le paragraphe *6.4.2.2.*, qui lui permettra d'agir sur tous les leviers possibles. Nous avons en effet montré qu'apprendre, c'était tout à la fois :

- Ajouter des éléments à une conception préexistante (cas des apprentissages de type constructiviste, par assimilation-accommodation notamment) ;
- Elaborer une conception (sites actifs et heuristique) structurant le savoir à partir d'informations cérébrales élémentaires (cas des apprentissages par imprégnation ou imitation notamment) ;
- Modifier ou créer un schème de pensée (structure I, II, II ou IV, site actif ou heuristique) préexistant (cas des apprentissages en mode K notamment) ;
- Créer des liens entre deux conceptions disjointes ;
- Rendre accessible une heuristique/conception peu ou mal utilisée ;
- Elargir une heuristique particulière, assouplir une conception (cas des apprentissages adaptatifs effectués en mode R notamment) ;
- Prendre conscience de ses « plis cognitifs » et confronter les conceptions qui les constituent ;
- Bousculer ses paradigmes de pensée en commençant par en prendre conscience ;
- Inhiber ou désinhiber une conception erronée dans certaines situations ;
- Désinhiber une heuristique utile dans d'autres situations…

Bien entendu, il est toujours possible de se référer aux environnements didactiques voire directement à la théorie.

9.2. Bonnes pratiques d'utilisation de l'expérience contre-intuitive

Les résultats théoriques et expérimentaux menés sur l'exemple des expériences contre-intuitives, initialement obtenus dans l'optique de mettre à l'épreuve les prédictions théoriques du modèle allostérique formalisé, conduisent de manière secondaire, mais non moins intéressante, à la formulation de divers constats et recommandations relatifs à l'utilisation de cet outil pédagogique très performant (figure 85). Nous les recensons ci-dessous de manière synthétique :

- Si l'expérience proposée n'est pas compatible avec le cadre de référence de l'apprenant, il n'y trouvera ni intérêt, ni source de perturbation pour ses conceptions. Au pire, il aura l'impression d'être incapable de comprendre la science qui lui est proposée, ce qui l'éloignera de l'objectif visé.
- En l'absence de questionnement et d'accompagnement, une expérience « trop » contre-intuitive, c'est-à-dire s'éloignant trop des conceptions initiales des apprenants, aura peu de chances de susciter de l'intérêt pour son interprétation. Au contraire, le résultat risquera de conforter l'apprenant que la nature est incompréhensible et la science inaccessible, voire d'induire chez lui des idées fausses.
- En effet, certaines expériences, très spectaculaires (et à ce titre souvent employées par les vulgarisateurs) ne peuvent être comprises qu'en faisant appel à des notions totalement hors des zones proximales de développement de tout individu n'ayant reçu une formation scientifique

minimale. Par suite, quelle que soit la manière de les présenter, il est inutile d'espérer qu'elles puissent contribuer à un quelconque apprentissage. Au contraire, dans la mesure où elles sont contre-intuitives et ne peuvent être interprétées avec les « bons » arguments, il y a toutes les chances pour qu'elles le soient avec des « mauvais », contribuant ainsi à créer ou à ancrer des conceptions erronées.

- Sans accompagnement, les expériences contre-intuitives nécessitant par essence de faire appel à des interprétations inhabituelles, chaque petit détail non maîtrisé (boîtes noires, boutons superflus, décorations…) est susceptible d'induire l'apprenant en erreur dans ses tentatives d'explications.
- S'il ne porte pas précisément sur les phénomènes mis en œuvre, le questionnement préalable est insuffisant (voire néfaste) à la mobilisation des conceptions ciblées par l'expérience contre-intuitive. L'apprenant ne peut alors se faire aucune idée de la manipulation à effectuer, du résultat à venir ou du degré de réflexion que l'on attend de lui ; il ne peut donc pas mobiliser et formuler préalablement les conceptions supposées être perturbées par l'expérience contre-intuitive. On se heurte particulièrement à cet écueil dans les expériences contre-intuitives de type « expériences impossibles » où le questionnement est proposé sous forme de défi expérimental et non de prévision du résultat d'une expérience donnée.
- En l'absence d'accompagnement, même le questionnement préalable est parfois insuffisant pour susciter la contre-intuitivité, notamment lorsque le questionnement est posé sous forme de défi dans les expériences de type « expériences impossibles » car la contre-intuitivité ne peut émerger que si le défi a été résolu, ce qui n'est pas toujours le cas.
- L'expérience de type « expérience impossible », présentée telle quelle sans questionnement ni accompagnement, ne peut conduire à aucun apprentissage si le défi n'est pas relevé. S'il l'est, il est probable que l'apprenant se contentera d'avoir trouvé la solution et ne se souciera pas de comprendre le phénomène. En tout état de cause, parce qu'elle est « contre-intuitive » et donc incompréhensible pour l'apprenant, ce dernier ne pourra faire évoluer ses conceptions si rien ne le pousse à les exprimer et à proposer des interprétations.
- En l'absence de questionnement et d'accompagnement, il est peu probable que le résultat d'une expérience contre-intuitive puisse être enregistré et mobilisable ensuite, à moins qu'il ne corresponde par hasard à une notion juste, assimilable par l'apprenant.
- L'information perturbatrice n'est pas nécessairement utilisée par l'apprenant pour faire évoluer ses conceptions initiales, même si elles ont été formulées et mises en défaut. C'est notamment le cas lorsque elles le conduisent à mal percevoir l'information fournie par l'expérience, à l'adapter à ses conceptions initiales, à contester l'observation qu'il a faite (invocation du cas particulier, mise en cause de la mesure, de la méthode utilisée…), voire à rejeter (et éventuellement oublier) l'information perturbatrice.
- Faute de questionnement et d'accompagnement, il arrive que les expériences soient présentées de manière à « guider » l'apprenant dans la façon de les mettre en œuvre. Cette « scénographie » peut pourtant nuire à l'apprentissage en induisant des conceptions fausses, confortées ensuite par les résultats de l'expérience.
- En tout état de cause, la seule observation du phénomène contre-intuitif, même s'il s'agit d'une observation dirigée, n'est souvent pas suffisante pour induire son explication correcte et complète, notamment dans les cas où elle ne conduit qu'à la compréhension des aspects techniques de l'expérience. Cela ne l'empêche pas d'être conservée (stockée) par l'apprenant, qui semble alors souvent démuni et perdu, voire démotivé. Aucun apprentissage ne peut alors se faire.

Ces résultats on été publiés entre décembre 2002 et août 2004 dans 1/ la *Lettre des sciences chimiques du CNRS* (Eastes, 2002), 2/ les *Cahiers pédagogiques* (Eastes & Pellaud, 2002), 3/ le *Journal de la*

Société ouest-africaine de chimie (Eastes, 2003), 4/ l'*Actualité Chimique* (Eastes & Pellaud, 2003), et 5/ le *Bulletin de l'Union des Physiciens* (Eastes & Pellaud, 2004 b et c).

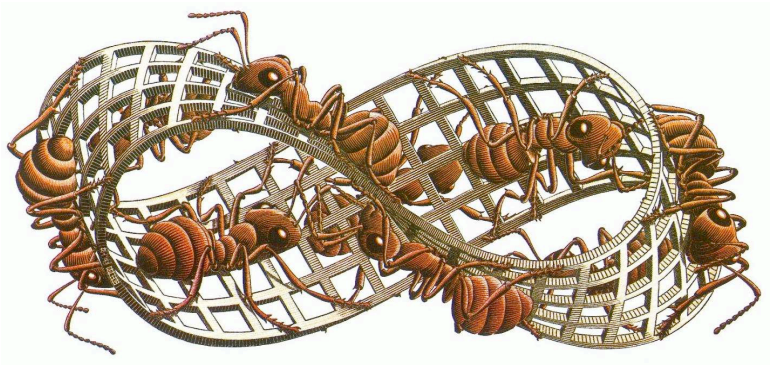


Figure 85 : Exemple d'objets contre-intuitif : les représentations du peintre M.C. Esher telles que, par exemple, le ruban à une seule face et un seul bord intitulé *Moebius Band II*.

9.3. L'approche phénoménologique des sciences

La difficulté de présenter des expériences contre-intuitives en situation d'enseignement ou de médiation scientifiques réside dans le fait que, justement parce qu'elles sont contre-intuitives, leurs interprétations nécessitent souvent des connaissances élaborées que seule la théorie peut fournir. Dès lors, on entend souvent les vulgarisateurs expliquer « avec les mains » le théorème de Bernoulli avant de s'y appuyer pour « expliquer », par exemple, l'expérience des « feuilles amoureuses » utilisée dans notre recherche expérimentale, mais sans se rendre compte que cette approche ne permet pas de comprendre « réellement » ce qui se produit.

Il est vrai que pour comprendre un phénomène et construire les schèmes interprétatifs adéquats, il est souvent indispensable (du moins en sciences expérimentales) de commencer par en construire d'autres, liés à la théorie elle-même, avant de les appliquer au phénomène observé. En termes de charge cognitive et de barrières d'activation, on peut donc être pessimiste quant à la possibilité de procurer une compréhension rapide des phénomènes. Si ce temps de latence ne constitue pas un problème en situation scolaire (c'est même l'un des rôles des enseignements scientifiques que de donner accès à la compréhension des théories), il est nettement plus problématique en situation de vulgarisation scientifique où le temps est toujours beaucoup plus limité et le public moins captif.

Sur la base de ces constats, et nous appuyant sur la compréhension allostérique de la perception du monde que confèrent leurs structures cognitives aux apprenants, nous avons tenté d'élaborer une approche directe des phénomènes de la nature, c'est-à-dire qui ne « passe » pas par l'appréhension préalable de la théorie, et qui soit entièrement fondée sur les connaissances des apprenants. Nous l'avons nommée « approche phénoménologique » ; en plus d'une approche pédagogique originale, elle propose notamment une analyse de l'idée de « compréhension » en sciences.

La double origine de l'idée de *phénoménologie*, philosophique et scientifique, constitue la promesse d'une richesse insoupçonnée de son exploitation pédagogique. Son premier usage s'inspire de la méthode de Husserl et attribue ce qualificatif à toute philosophie qui se propose, par la description des choses elles-mêmes, de « découvrir les structures transcendantes de la conscience et des essences ». En sciences, le terme est plus souvent employé pour désigner une approche qualitative, largement fondée sur l'observation approfondie du phénomène étudié. Elle est souvent davantage inspirée par le « sens physique » du chercheur que par les constructions formelles qui préexistent sur le sujet, même si un « paramètre phénoménologique » peut de temps à autres être introduit dans une théorie qui ne disposerait pas de la grandeur physique adéquate.

La mécanique des fluides se risque par exemple à l'utilisation de l'hydrophobicité, pour éviter le recours à un traitement de thermodynamique statistique des interactions des fluides avec les parois solides. Or ce paramètre n'a pas de signification réelle, la notion de « caractère hydrophobe » ne désignant qu'une absence d'hydrophilie. De même que « l'interaction hydrophobe » n'existe pas, une substance hydrophobe ne « repousse » pas les molécules d'eau ; ses constituants moléculaires attirent simplement moins ces molécules qu'elles ne s'attirent mutuellement. Ce dernier exemple permet d'insister sur le fait que, bien que pas toujours exprimée par le chercheur, la « pensée phénoménologique » peut faire partie intégrante du processus de théorisation. Il ne s'agit donc pas d'une approche parallèle.

D'un point de vue épistémologique également, cette approche constitue presque un passage obligé dans l'élaboration historique d'une discipline scientifique. C'est la raison pour laquelle, on la trouve dans les sciences très récentes, tout simplement parce que les concepts et modèles qui peuvent l'appuyer n'ont pas encore été imaginés. C'est le cas de la physique des milieux granulaires où des phénomènes aussi spectaculaires et contre-intuitifs que le « chant des dunes » (Douady, 2002), la « dilatance de Reynolds »[79] ou la « ségrégation » des assemblées de grains sont encore expliqués « avec les mains », faute d'approches thermodynamiques, mécaniques ou numériques élaborées.

Une approche pédagogique fondée d'une part sur les pré-conceptions les plus robustes et les plus communes des individus, et d'autre part inspirée de cette démarche de recherche ne nécessitant ni prérequis, ni formalismes mathématiques, mais seulement de bonnes compétences d'observation et un minimum de bon sens est susceptible de permettre une médiation pédagogique performante sur le plan explicatif. Un exemple très simple, relatant une expérience réalisée dans une classe primaire lors de l'intervention de l'association *les Atomes Crochus*, est décrit dans l'encadré ci-dessous (voir également This, 2002).

Approche phénoménologique appliquée

Si monter des œufs en neige requiert une certaine dextérité, un peu d'habitude et la connaissance des ingrédients idéaux et des conditions optimales de température pour les réussir, il est probablement plus facile de surmonter ces difficultés que de répondre à la question suivante :

Pourquoi les œufs battus en neige sont-ils blancs ?

Telle est la question qui nous fut posée un jour, lors d'une intervention des *Atomes Crochus* dans une classe primaire (classe de CE2, Ecole de l'Arbalète, Paris 5e). L'intervention consistait alors à exposer les propriétés physico-chimiques de l'œuf, illustrées notamment par l'expérience de « décuisson » du blanc d'œuf cuit et par celle de la cuisson du blanc d'œuf cru « sans source de chaleur » (c'est-à-dire dans l'alcool à 90°).

Posée à des collègues physiciens ou chimistes, la question suscite invariablement l'appel à des concepts complexes tels que la « diffusion » de la lumière sur les bulles d'air ou sa « réfraction » aux « interfaces » air-œuf. Des concepts qu'il ne serait évidemment pas raisonnable d'évoquer dans une classe primaire. Fallait-il pour autant faire à ces enfants cette réponse désespérante : « *Vous verrez ça quand vous serez plus grands* » ?

Non, car l'approche phénoménologique de la formation de la mousse de blanc d'œuf offre une manière d'y répondre. La discussion entre *Les Atomes Crochus* et Martin, appelé à réaliser l'expérience devant ses camarades, est retranscrite ci-dessous.

Les At. Cro. : Je dépose un blanc d'œuf cru et entier dans ce bol. Tu vas prendre cette fourchette et y donner deux ou trois coups de fouet.

Martin réalise l'opération avec anxiété et maladresse.

Les A. C. : Qu'observes-tu ?

Martin : Euh… Il y a des bulles ?

Les A. C. : Oui. Et que vois-tu encore ? Sur les bulles par exemple ?

[79] La « dilatance » est la propriété du sable mouillé de s'assécher autour des zones qui subissent des pressions, comme par exemple autour des pieds lorsque l'on marche sur une plage léchée par les vagues.

Martin :	Des reflets ? … Je vois les fenêtres … pis les lampes …
Les A. C. :	Très bien ! En fait, tu vois les reflets de toutes les sources de lumière de la salle : vitres, lampes, etc. A présent, redonne encore quelques coups de fouet dans le blanc d'œuf avec ta fourchette. Que constates-tu ?
Martin :	Il y a plus de bulles.
Les A. C. :	Oui mais encore ? Comment sont-elles ?
Martin :	Elles sont plus petites.
Les A. C. :	Et les reflets, comment sont-ils ?
Martin :	Plus gros…
Les A. C. :	Pas vraiment, regarde bien. Ils sont plus petits parce que les bulles sont plus petites, mais comparativement à la taille de la bulle, en effet, ils prennent plus de place. Martin, peux-tu battre à présent le blanc d'œuf vigoureusement, sans t'arrêter, pour faire les bulles les plus petites et les plus nombreuses possibles ?
Martin, rassuré, s'exécute avec enthousiasme.	
Les A. C. :	Alors les enfants : que va-t-il se passer ?
Un enfant :	Ca va faire monter le blanc en neige !
Un enfant :	Ca va devenir blanc !
Les A. C. :	Et pourquoi va-t-il devenir blanc ?
Martin :	Parce qu'il ne va plus y avoir que des bulles, et toutes les bulles vont avoir un reflet blanc, alors tout sera blanc.
C'est ainsi que les enfants ont compris phénoménologiquement, c'est-à-dire sans effort et sans concepts théoriques, pourquoi les blancs battus sont qualifiés de blancs « en neige ». Quant à savoir s'ils auront été capables ensuite de mobiliser leur nouvelle connaissance, le lecteur pourra en juger par cette question qui a alors fusé d'un enfant jusque là silencieux :	
« Mais alors, si on éclaire l'œuf avec de la lumière rouge, le blanc en neige, il va être rouge ! »	

Pourquoi alors, dans une perspective de rationalisation et de généralisation à l'ensemble des activités de médiation scientifique, ne pas justement tenter d'emprunter aux meilleurs vulgarisateurs et aux sciences expérimentales en cours de construction, cette approche largement qualitative fondée sur l'analyse expérimentale et la mise en relation des phénomènes, dont des indices de pertinence sont fournis par les sciences cognitives, notamment à travers l'étude des théories naïves ? Exemptes de concepts, de lois, de formules, de théories, d'équations ou autres formalismes scientifiques, elle mène en effet à une compréhension qualitative et ressentie, souvent largement suffisante pour appréhender les comportements et propriétés de l'univers.

Pour compenser le manque d'outils théoriques, une telle approche devra se fonder en très grande partie sur l'observation du monde réel et faire souvent référence aux phénomènes les plus courants et les plus intuitifs qui s'y déroulent (figure 86). Ainsi, pour pallier l'impossibilité d'évoquer la notion « d'induction électromagnétique » ou de « courants de Foucault » dans l'interprétation du fonctionnement du ralentisseur électromagnétique des camions, on fera au préalable référence à un objet courant, la dynamo de vélo ou l'alternateur de voiture. En démontant la dynamo, on constatera qu'un courant électrique est créé par la rotation d'un aimant devant une bobine de fil, ce qui suffira (toujours dans le cadre de cette approche) pour admettre plus généralement qu'un objet conducteur en mouvement relatif par rapport à un aimant, est parcouru par un courant électrique. Bien entendu, elle pourra s'appliquer aux sciences anciennes autant que récentes. Elle s'appuiera alors sur des connaissances théoriques déjà bien maîtrisées et à ce titre, étayées par des modèles scientifiques ; pour le médiateur habitué à l'approche formelle, cette approche nécessitera donc une « déformalisation » des théories en vigueur. « *A partir de l'observation et de la description des phénomènes réels, élaborer « avec les mains » des interprétations exemptes de concepts élaborés qui mènent à une*

compréhension qualitative mais ressentie des comportements et propriétés de l'univers… » *:* telle pourrait être la définition de l'approche phénoménologique de l'enseignement des sciences.

Si elle n'a pas été caractérisée de cette manière, cette pratique de la médiation de la physique n'est pas nouvelle : d'autres y ont déjà songé, sous des formes un peu différentes dénommées *Conceptual Physics* outre Atlantique (Hewitt, 2002) ou *Fisica Ingenua* en Italie (Bozzi, 1998), l'association française *1,2,3 Sciences* ayant par ailleurs proposé l'idée du « gros mot scientifique »[80]. Toutefois, faute d'un cadre théorique construit et diffusé, elle reste confinée à de petits îlots de praticiens inspirés.

« L'approche phénoménologique des sciences », telle que nous l'avons développée, a été publiée et décrite plus en détail en 2004 et 2006 dans 1/ les *Actes des Journées de Chamonix* (Eastes & Pellaud, 2004 d) et 2/ les *Cahiers pédagogiques* (Eastes & Pellaud, 2006).

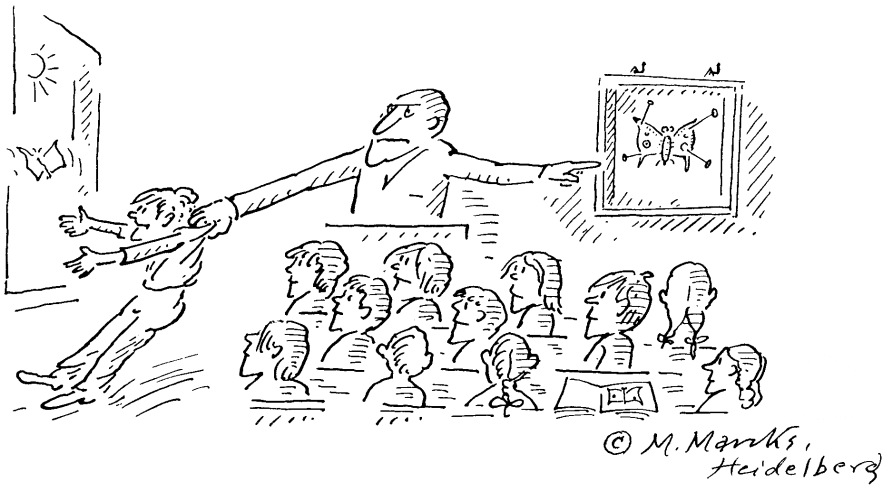


Figure 86 : Un état d'esprit peu « phénoménologique ».

9.4. Des outils pédagogiques pour la médiation scientifique et l'enseignement

- Exemples généraux

Le recours au travail sur les conceptions des apprenants dans une perspective allostérique peut avoir une multitude d'applications pédagogiques et médiationnelles. Parmi elles, le procédé qui consiste à mettre en scène un personnage auquel les enfants s'identifient et à mettre dans sa bouche des mots et conceptions relevées lors d'enquêtes préliminaires auprès d'eux permet d'imaginer des formes littéraires ou théâtrales originales. C'est ce à quoi se sont livrés les *Atomes Crochus* dans divers projets tels que :

- Un « livre magique » intitulé *Mais qui fabrique les bébés ?* inspiré du travail de licence de Francine Pellaud (LDES), dans lequel des enfants discutent de la procréation humaine en émettant des idées effectivement relevées dans des classes auprès d'enfants du même âge que ces personnages. Les conceptions fausses sur la procréation humaine sont ici exprimées sous forme de bulles rigolotes qui ne laissent pas le petit lecteur penser un seul instant qu'elles puissent être correctes. L'ouvrage l'accompagne alors vers les connaissances qu'on souhaiterait lui voir acquérir.
- Des textes et spectacles de contes scientifiques, qui s'appuient dans une moindre mesure sur des relevés de conceptions mais s'inspirent de l'approche phénoménologique et des progressions

[80] *L'agitateur* ; 1, 2, 3 Sciences, Antony, www.123-sciences.asso.fr - Dernière consultation : 05/02/2013.

pédagogiques suggérées par les environnements didactiques du modèle allostérique. Deux types d'expériences ont été menées dans cette voie : 1/ des contes écrits et joués par des professionnels[81] et 2/ des contes et comédies musicales conçues par des enfants, accompagnés par les *Atomes Crochus*, sur divers thèmes tels que la chimie, la pollution ou la lumière.

- Plusieurs spectacles de clowns de science[82], où les comédiens reproduisent des idées entendues au sein des publics auxquels les spectacles s'adressent. En vertu de sa richesse, ce dernier exemple mérite quelques développements (figure 87).

○ Le concept de *clown de science*

L'observation d'une grande proximité entre le clown et les enfants, surtout lorsqu'elle est mise en perspective avec la distance qui, dans les spectacles des *Atomes Crochus*, sépare ces derniers du Professeur Spatule incarnant le savant, ouvre la voie d'un processus pédagogique extrêmement intéressant. Car le clown, plongé dans l'univers hostile d'un laboratoire face à un personnage bien plus savant que lui et presque un peu dédaigneux, est véritablement susceptible d'incarner l'élève en difficulté face à son professeur. C'est ce que confirme par exemple J.-B. Bonange lorsqu'il écrit : « *Le clown se nourrit de notre faiblesse et de notre fragilité –l'enfant, le naïf, le raté, l'écorché en nous– et c'est justement sa vulnérabilité qui lui donne sa force et son aura. Le clown, c'est l'amplificateur de nos dimensions cachées* » (2002).

Plus qu'une appréhension du clown comme un « presque camarade » par l'enfant, il existe donc une possibilité de voir l'enfant s'identifier lui-même au clown. Ce phénomène peut être exploité pour proposer aux jeunes publics de véritables messages en matière d'apprentissage, de confiance en soi, de relation à l'enseignant, à la science et au savoir en général. Si, comme l'exprime Serge Martin (cité par Bonange, 2000), *« Le plus désespéré des pauvres types peut encore rêver d'un monde à son image parce qu'aux pires moments de son péril, le clown réussit des prouesses inattendues* », alors le plus mauvais élève doit encore pouvoir rêver devenir scientifique lorsqu'il voit un clown progresser dans sa compréhension des phénomènes de la nature et dans sa maîtrise des instruments des scientifiques.

Personnage novice maladroit se retrouvant un peu par hasard au milieu d'objets et de produits hétéroclites et inquiétants, le clown de science pose des questions, se trompe, imagine, se fait gronder ou encourager. Bref, il apprend. Et il montre aux enfants qu'eux aussi peuvent apprendre. Ce que confirme à nouveau J.-B. Bonange en rappelant que « *Le jeu du clown révèle des vérités mais ce n'est pas lui qui les détient. Il a un rôle de catalyseur et non de donneur de leçons (le pauvre ! il en serait bien incapable…) et c'est pour cela que sa parole est bien reçue* » (2000). Mieux, face au clown qui transgresse les règles et détourne les usages, l'enfant se retrouve soudain dans une posture plus sage et plus responsable. Il sait, lui, que le clown est en train de « faire des bêtises » ou qu'il se trompe. Un élément qui peut contribuer, dans une démarche de médiation scientifique, à lui (re)donner confiance en lui.

Mis en perspective avec le modèle allostérique de l'apprendre, ce processus d'identification ouvre d'autres pistes pédagogiques. Il nous incite en effet à récolter en classe les conceptions erronées les plus courantes sur des enfants d'âge donné, puis à les redéposer dans la bouche du clown avec la même formulation que la leur. Comme il est prévisible qu'il soit peu pris au sérieux, on s'attend à ce que les enfants n'hésitent pas à remettre en question ses propos, même lorsqu'ils sont relativement crédibles puisque issus de leurs propres conceptions (« *On ne peut pas allumer un feu avec de l'eau !* » affirmait par exemple le Clown Molécule avant que le Professeur Spatule n'enflamme un verre d'eau en y jetant un morceau de sodium). Charge alors au scientifique, au clown lui-même ou au scénario de les

---

81 Voir notamment www.atomes-crochus.org/rubrique16.html - Dernière consultation le 05/02/2013.

82 Voir notamment www.atomes-crochus.org/rubrique15.html et www.science-clowns.fr - Dernière consultation le 05/02/2013. Un colloque sur la question a été organisé à l'Espace des sciences Pierre-Gilles de Gennes (Paris) en juin 2012.

accompagner vers des idées plus justes, une mise en scène adaptée permettant enfin d'accroître l'efficacité du phénomène ; ce que confirme poétiquement J.-B. Bonange en ces termes : « *Le discours scénique du clown est un mot d'enfant* » (1998).

Nous avons développé l'utilisation pédagogique des contes scientifiques dans diverses publications entre 2007 et 2001, et notamment dans les *Annales des Mines* (Pellaud *et al.*, 2007 a), 2/ la revue *Grand N* (Pellaud *et al.*, 2007 b) et 3/ un ouvrage collectif publié aux éditions *Les Atomes Crochus* (Eastes & Pellaud, 2011 b). Cet ouvrage a notamment accueilli un chapitre sur le clown de science (Eastes & Pellaud, 2011 a), complété par des articles publiés en 2010 dans les revues *Current Challenges in Basic Science Education* de l'Unesco (Eastes & Pellaud, 2010 a) et *Culture Clown* (Eastes & pellaud, 2010 b).

Figure 87 : Etude de la propagation de la lumière par Mlle Renoncule, clown de science chez les *Atomes Crochus*.

9.5. Des outils pour la communication institutionnelle

Enfin, la compréhension des processus d'apprentissage et du fonctionnement de la pensée permet d'explorer la question du traitement cognitif individuel de l'information dans le cadre des questions socialement vives. Elle est alors susceptible de permettre de mieux comprendre comment la société civile, ou du moins le citoyen confronté aux informations livrées par les médias, réagit à des sujets sociotechniques controversés tels que les OGM, nanotechnologies, pesticides et autres vaccins…

Dans un modèle très simplifié, car se situant à un niveau différent du modèle allostérique, on peut considérer que le système cognitif individuel reçoit et interprète les informations à partir de deux composantes distinctes : l'une est en effet rationnelle mais l'autre, au moins aussi importante, est émotionnelle. Certes cette distinction est-elle un peu artificielle et aucun individu n'aura probablement jamais conscience d'interpréter une donnée à l'aide de l'une ou de l'autre exclusivement, pour la bonne raison qu'elles fonctionnent de concert. Toutefois, pour les besoins du modèle, nous les considérons l'une après l'autre pour comprendre ce qui sous-tend leurs fonctionnements respectifs.

- La composante rationnelle

La première composante est *rationnelle* et nous distinguons trois pôles principaux autour desquels elle s'organise :

- Les *représentations* sont de l'ordre des connaissances, des idées reçues et des images mentales. Elles représentent ce que l'on nomme naïvement le « savoir », en oubliant que ce dernier est riche de caractéristiques et composantes beaucoup moins concrètes. En fonction de ces représentations, on peut désirer une chose objectivement (un poulet avec label), ou en avoir légitimement peur (des murs isolés à l'amiante). A partir d'informations objectives, voire factuelles, elles influencent notre perception du monde et la manière dont nous traitons les informations nouvelles.
- Les *valeurs* peuvent être simplement définies comme « ce à quoi l'on tient, parfois inconsciemment, et ce pour quoi on est prêt à se battre ». Parce qu'elles correspondent à nos convictions et à nos croyances, au monde idéal que l'on souhaite, à celui dans lequel on se sent le plus adapté, à celui qui limitera nos tourments et afflictions, ou encore à celui qui permettra l'épanouissement de nos enfants, elles influencent très largement nos attentes (en matière de qualité de l'alimentation par exemple) et conditionnent ce que nous refusons et rejetons (les OGM en tant qu'inacceptable « manipulation du vivant » par exemple). Contre elles, les discours rationnels ne peuvent donc rien s'ils ne s'accompagnent pas d'une clarification de celles qui sont impliquées.
- Faute d'être capables de « tout savoir » et de disposer de valeurs claires sur tous les sujets, il nous faut produire seuls ce qui nous manque. C'est le rôle de *l'imaginaire*, qui représente notre capacité à produire des informations, des images mentales, des opinions. C'est le pôle le plus proche de l'émotion et il est fortement alimenté par cette composante. A ce titre, et parce qu'il gère également la relation entre nos représentations et nos valeurs, il produit tout à la fois peurs et attrait, attentes et rejet. Ainsi, il joue un large rôle dans la perception collective des technologies telles que les biotechnologies par exemple (on parle même « d'imaginaire collectif »), notamment en vertu de la complexité du sujet et de sa sensibilité sur le plan éthique.

Ces trois pôles fonctionnent en étroite relation, donnant un sens aux choses et produisant « l'impression de compréhension ». Mus par des « capacités de raisonnement » plus ou moins développées et des « modes de raisonnement » plus ou moins logiques, souvent implicites, ils s'apparentent à ce que, dans notre travail, nous avons nommé *conceptions*.

- La composante émotionnelle

La seconde composante est *émotionnelle*. Nous distinguons là encore trois pôles principaux, qui la conditionnent d'une manière similaire :

- Les *désirs* sont les équivalents émotionnels des représentations et dialoguent avec elles. En tant que volontés d'obtenir une chose ou au contraire de ne pas la subir, ils sont généralement explicites et concrets. Selon les modes, les habitudes de consommation, les âges et les catégories socioprofessionnelles, ils peuvent être plus ou moins prégnants, conditionnant notamment l'attrait pour une chose (n'importe quel fruit à n'importe quelle saison) ou la peur de ne pas en voir une autre satisfaite (des aliments sans traçabilité). Il appartient alors au communiquant de jouer avec ces peurs et ces désirs (par exemple : « *Les techniques de préservation modernes des fruits et légumes vous permettent de les consommer hors saison* »).
- Les *besoins* sont quant à eux les pendants émotionnels des valeurs. Souvent implicites et abstraits, ils représentent non plus « ce qui est souhaitable » comme c'est le cas des désirs, mais « ce qui est indispensable ». A ce titre, ils produisent de formidables attentes en même temps que des rejets absolus, en définissant en creux des « zones d'intolérance ». Ils ne sont pas

accessibles directement pour le communiquant, mais se devinent notamment lors de l'expression des valeurs.

- Les *ressentis* sont le point de convergence des désirs, des besoins et, dans une certaine mesure, de l'imaginaire. Ils représentent à la fois la manière dont ils s'expriment et ce qui les influencent. Ils sont propres à chaque individu et imprégnés de son histoire personnelle ; aussi sont-ils très peu maîtrisables. Face à une publicité pour une moto puissante, l'un sera fasciné par ses courbes féminines (un élément pris en compte par les designers de motos, bien qu'il fasse sourire) alors qu'à l'autre, il rappellera l'accident qui lui aura fait perdre l'usage des jambes. Dans l'impossibilité d'exploiter tous les ressentis susceptibles d'habiter les personnes cibles, la communication ne devra pas pour autant oublier de tenir compte de leur diversité.

Comme ceux qui gouvernent la composante rationnelle de la pensée, ces trois pôles régissent les *émotions*, autour desquels ils s'articulent grâce à « l'intelligence émotionnelle » chère au psychologue Goleman (1997), qui constitue elle-même l'équivalent émotionnel des *conceptions* évoquées plus haut.

- Synthèse

La figure 88 résume les articulations entre ces différents paramètres et montre comment une information, quelle qu'elle soit, est traitée par les deux composantes du système cognitif individuel pour produire une réaction qui dépend des peurs, attraits, attentes et rejets qu'elle a ainsi suscités. En termes de communication, l'essentiel à retenir de ce schéma est l'impossibilité de ne s'adresser qu'à l'un des six pôles de ces deux composantes. Ainsi une campagne « éducative », uniquement ciblée sur les contenus autour d'une argumentation rationnelle, risquera de se heurter aux valeurs, désirs, imaginaires, besoins et ressentis de ses destinataires, avant même de toucher à leurs représentations. Mais dans l'objectif de l'exploiter comme un guide pour l'élaboration de campagnes, ce diagramme permet d'imaginer deux stratégies de communication et deux approches distinctes.

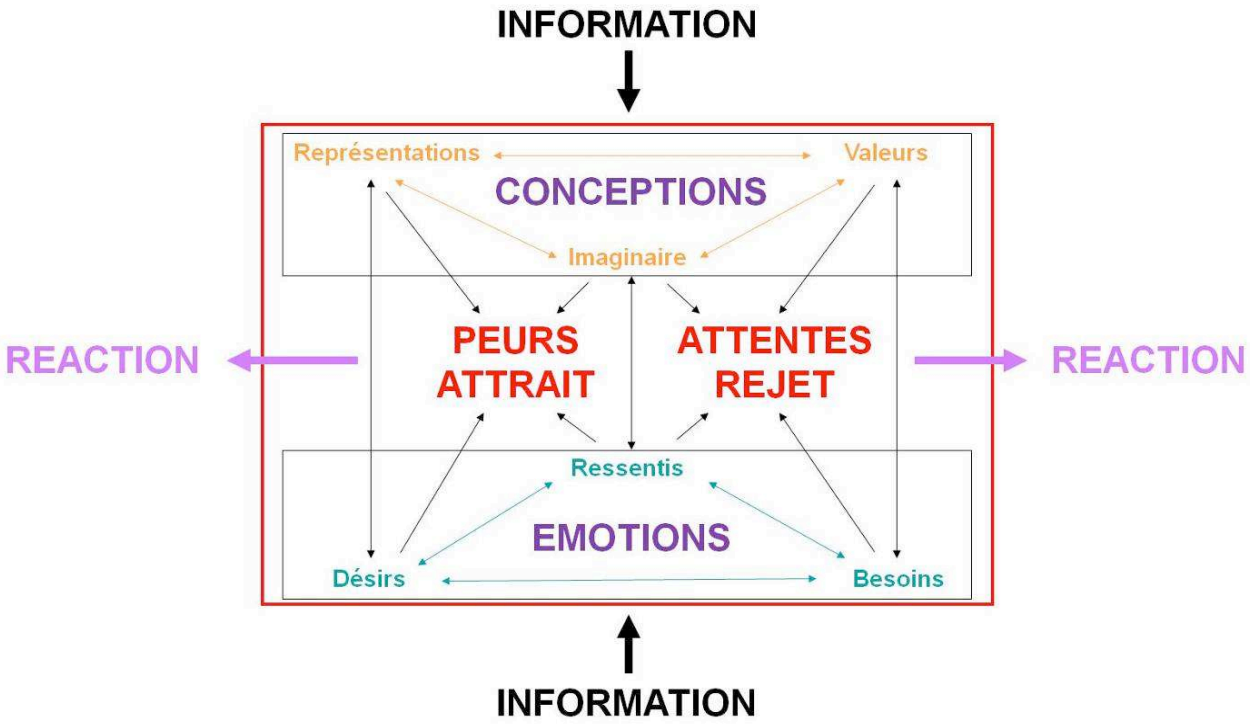


Figure 88 : Modélisation de la réception d'une information par le système cognitif individuel, prenant en compte la dimension émotionnelle, dans la perspective de l'élaboration de campagnes de communication.

- Communiquer : 2 stratégies + 2 approches = 4 possibilités

La première stratégie possible consiste à exploiter ce que les deux composantes de la pensée peuvent produire de positif. Compte tenu des deux types de réactions que nous avons décrits, cela peut consister à :

- Réduire les peurs, aller au devant des attentes
- Accroître l'attrait, rassurer contre le rejet

A l'inverse, la stratégie négative flattera les productions négatives de l'esprit et consistera à :

- Amplifier les peurs, stimuler les attentes
- Relativiser l'attrait, susciter le rejet

Dans le cadre de chacune de ces deux stratégies, une campagne de communication pourra en outre être ciblée majoritairement et respectivement sur les composantes rationnelle ou émotionnelle évoquées plus haut.

Plusieurs articles ont été publiés sur ces sujets à partir de 2011, et notamment dans un ouvrage publié aux *Editions du CNRS* (Eastes, 2011 a) ou dans l'*Actualité Chimique* (Eastes, 2011 b), servant à leur tour de base aux travaux et publications d'autres ouvrages par le groupe Traces[83] (Eastes, 2011c par exemple).

[83] Voir notamment http://sites.google.com/site/projetstraces/ - Dernière consultation le 05/02/2013.

10. CONCLUSION

« Aimer *Aimer*
C'est savoir ne pas tout dire, *C'est aussi apprendre*
Parfois. Ne pas détruire *A dire ces mots tendres*
L'autre qui est en toi *Et oser te surprendre »*
Francine Pellaud (2000), compositrice et pédagogue (Suisse).

Grâce à ses volets théoriques, pratiques et expérimentaux, cette recherche a permis d'atteindre plusieurs objectifs, et notamment les perspectives annoncées par le titre de la thèse : « *Processus d'apprentissage, savoirs complexes et traitement de l'information : un modèle théorique à l'usage des praticiens entre sciences cognitives, didactique et philosophie des sciences* ».

En premier lieu, elle a permis de développer les aspects formels d'un modèle didactique déjà très diffusé auprès des enseignant, le *modèle allostérique de l'apprendre* développé par Giordan *et al.*, dans la perspective de le renforcer, de l'étayer et de le crédibiliser d'un point de vue non plus seulement pratique mais également théorique. Pour ce faire, il a été nécessaire de le ré-intégrer dans le paradigme des *théories du changement conceptuel*, tout en montrant ses larges avantages par rapport aux approches qui relevaient jusqu'ici de ces théories. Surtout, ces aspects théoriques ont été développés en tenant compte des résultats les plus probants des sciences cognitives et, plus particulièrement, des neurosciences, qui ouvrent des voies nouvelles à l'étude des processus d'apprentissage. En outre, parce qu'il a été nécessaire d'imaginer des protocoles destinés à valider ou éprouver nos hypothèses de recherche relatives aux développements théoriques du modèle, nous pouvons considérer que notre recherche a permis de prouver globalement la pertinence des fondements sur lesquels il repose.

Certes, comme l'indique le titre, notre travail s'est limité aux processus d'acquisition des savoirs complexes ; mais c'est justement dans ce domaine que les sciences cognitives peinent encore à développer leurs propres théories du cerveau et de l'apprentissage. Ce faisant, nous pensons que notre travail, conformément à nos objectifs de départ, est susceptible de contribuer à dresser un pont entre l'approche pragmatique des didacticiens et l'approche de laboratoire des cogniticiens.

En second lieu, nous pensons avoir inauguré, avec le recours à la théorie de la réactivité chimique, une approche inédite, féconde et originale pour décrire les processus de pensée, et pas seulement les mécanismes d'apprentissage. Certes le recours à des théories issues de champs disciplinaires extérieurs, et notamment des sciences de la matière, pour expliciter des phénomènes relevant des sciences humaines est-il dangereux. Mais nous pensons avoir pris les précautions nécessaires pour ne pas avoir appliqué à ces dernières des résultats illégitimes. En particulier, l'arsenal d'outils que nous avons introduits et adaptés à la description de l'apprendre, et en particulier l'ensemble des fonctions d'apprentissage et leurs représentations graphiques, nous semble intéressant pour des développements ultérieurs en sciences de l'éducation et en philosophie des sciences, mais également en épistémologie.

Car nombreux sont les processus qui nécessitent le passage d'un état initial à un état final *via* le passage d'une barrière d'activation. Et parmi eux, nombreux sont les cas où la formalisation que nous avons développée est susceptible de s'appliquer, non sans quelques précautions épistémologiques d'usage pour définir convenablement les paramètres et concepts représentatifs des systèmes étudiés.

Les notions de barrière d'activation et d'état de transition, en tant que concepts transversaux, sont par exemple riches de transpositions potentielles à la théorie de la révision des croyances (Gärdenfors, 1992).

En troisième lieu, parce que la formalisation du modèle allostérique que nous avons opérée a nécessité sa confrontation aux théories existantes, ses développements sont en retour susceptibles d'éclairer certaines d'entre elles, d'en proposer des explicitations, des formulations nouvelles, voire des récusations. Il en va ainsi des processus de traitement de l'information par le système cognitif individuel, qui ont été complètement explicités par la description de la dynamique de la construction des heuristiques du modèle allostérique, et caractérisés formellement par les grandeurs thermodynamiques, liées aux hypersurfaces d'énergie que nous avons introduites pour représenter les fonctions d'apprentissage. Un tel outil, théorique mais inspiré et éprouvé par la pratique, pourrait également se révéler utile aux recherches en sciences cognitives lorsqu'elles portent sur les processus d'apprentissage complexes, en orientant par exemple les observations réalisées par les techniques d'imagerie cérébrale ; il devrait aussi permettre de nourrir les recherches de philosophie des sciences, telles que l'étude du phénomène de « compréhension » en sciences.

En quatrième lieu, il est notable que la définition d'environnements didactiques correspondants aux différents paramètres du modèle allostérique ait permis d'imaginer une approche pédagogique globale, applicable à toutes les situations d'apprentissage, et en particulier aux situations éducatives, qu'il s'agisse d'enseignement, de formation, de vulgarisation ou même de communication. Ils offrent au choix une grille d'analyse de pratiques existantes, un guide pour la mise en place de pratiques nouvelles, ou des pistes de compréhesion concrètes des processus d'apprentissage. Dans la partie *9. Applications et perspectives*, plusieurs pistes ont été proposées, notamment dans la sous-partie *9.1. Conseils aux enseignants pour une approche pédagogique « allostérique »*.

Selon les cas, la nature des savoirs en jeu, la manière de les aborder et les conditions matérielles de l'enseignement, l'exploration d'un ou de plusieurs paramètres pourra toujours être privilégiée ; mais l'approche globale et l'état d'esprit général pourront être qualifiés d'*allostérique*, l'ensemble constituant une sorte de cadre pédagogique programmatique.

En cinquième et dernier lieu, la recherche expérimentale qu'il nous a été nécessaire de mener pour éprouver les développements théoriques du modèle allostérique nous semble avoir apporté des informations pertinentes et utiles sur l'utilisation d'un outil pédagogique particulier, l'*expérience contre-intuitive*, et sur le recours à l'expérience en situation d'enseignement des sciences de manière générale. En soi, cette partie de la thèse constitue un résultat important, indépendamment de son lien avec la validation de notre partie expérimentale.

La question de l'intelligibilité du modèle pour les praticiens de l'enseignement et de la communication, cœur de cible de cette étude, doit toutefois être posée : une grande force du modèle allostérique de Giordan est d'être rapidement appréhendé par les enseignants, tout en leur offrant des informations nouvelles et même parfois contre-intuitives. D'une certaine manière, il se situe dans leur zone proximale de développement. Il est clair que l'approche formalisée, à l'aide de fonctions mathématiques, de représentations graphiques et de fonctions d'état tirées de la théorie de la réactivité chimique, ne jouit pas des mêmes attraits.

L'expérience montre toutefois qu'il n'est pas nécessaire de disposer de connaissances approfondies en mathématiques et en sciences expérimentales pour comprendre les idées fondamentales de cette approche lorsqu'elle est vulgarisée. En particulier, la « courbe d'activation » s'est toujours avérée très parlante pour les praticiens qu'il nous a été donné de rencontrer en conférence ou en formation (des

enseignants de l'université à ceux de l'école maternelle). Or à partir de cette simple courbe, sans entrer dans le détail de son origine (coupe dans une hypersurface le long d'un chemin de plus basse énergie), il est déjà possible d'accéder à l'essentiel des enseignements du modèle. Reste alors de côté la notion d'entropie, mais l'idée de « souplesse du savoir » est elle aussi généralement bien comprise, même si elle est plus qualitative que sa grandeur associée.

Enfin, il faut reconnaître que si la formalisation que nous avons faite du modèle allostérique repose sur une analogie avec la réactivité chimique et en emprunte des concepts spécifiques, il n'est pas nécessaire de maîtriser cette dernière pour comprendre cette nouvelle version du modèle. En effet, nous avons pris soin de toujours introduire les concepts et leurs articulations en tant que ce qu'ils représentaient pour l'apprentissage, et non pas en y plaquant métaphoriquement des concepts issus d'une autre discipline.

En dépit de ces constats positifs, nous considérons ce travail comme une ébauche ; une proposition qui à la fois complète des travaux existants et appelle des prolongements plus pertinents. Qu'il ait une utilité à l'avenir ne change toutefois rien au constat selon lequel la science accroît quotidiennement notre compréhension du cerveau, de la pensée et de l'apprentissage, et que cette compréhension est appellée à jouer un rôle important à l'avenir dans notre manière d'éduquer nos enfants, de remédier à leurs difficultés d'apprentissage, de les former à leurs futurs métiers et de bâtir les sociétés de la connaissance de demain. L'enjeu est fondamental, mais ces connaissances fines pourraient tout aussi bien être utilisées par les publicitaires ou les idéologues pour tenter d'imposer plus facilement des produits ou idées, à l'encontre des choix naturels qui seraient les nôtres. En tant que chercheurs, nous sommes responsables de l'usage qui sera fait des connaissances que nous produisons, et devons tout à la fois nous interroger sur leur devenir et rester vigilants quant aux intentions de ceux qui voudront les utiliser.

11. BIBLIOGRAPHIE

« *L'enseignement obligatoire semble miner la volonté personnelle d'apprendre.* »
Ivan Illich (1926 – 2002), penseur critique allemand de la société industrielle.

1. ALBERONI, F. (1993) *Le choc amoureux*, Pocket, Paris.
2. ANDERSON, C.W. & SMITH, E.L. (1983) Children's preconceptions and content area textbook in DUFFY, G. *et al. Comprehension instruction : perspectives and Suggestions*, Longman, Londres.
3. ANDLER, D. (2002) Processus cognitifs, *in* ANDLER, D. FAGOT-LARGEAULT, A. SAINT-SERNIN, B. *Philosophie des sciences,* Gallimard, Paris.
4. ANDLER, D. (2004) *Introduction aux sciences cognitives*, Folio Essais, Gallimard, Paris.
5. ANDLER, D. (2007a) Du bon usage des sciences (cognitives) et des techniques (TIC), *in* BENTOLILA, A. (dir.). *Quel avenir pour l'école ?* Nathan, Paris, 119-126.
6. ANDLER, D. (2007b) Article « Sciences cognitives », *Encyclopaedia Universalis* (actualisation 2007).
7. ANDLER, D. (2008) Sciences cognitives et éducation : une relation sérieuse, *Apprendre demain, sciences cognitives et éducation à l'heure du numérique*, Cap Digital Education, Editions Hatier, Paris.
8. AUGUSTINE, D. GREBER, K. & HANSON, L. (1990) Cooperation Works, *Educational Leadership*, 47, 4, 4-7.
9. AUSSUBEL, D.P. (1966) *Readings in the psychology of cognition* (1966) ed. by ANDERSON, R-C, AUSUBEL, D.P. Hlot, Tinehart & Winston, Inc. New York, Chicago, San Francisco, Toronto, London.
10. AUSUBEL, D.P. *et al.* (1968) *Educational psychology a cognitive view*, Holt, Rinehart & Winston, New York.
11. BACHELARD, G. (1934), *Le nouvel esprit scientifique*, PUF, Paris.
12. BACHELARD, G. (1938) *La formation de l'esprit scientifique*, Librairie philosophique J. Vrin, (pour l'édition de poche, 1993), Paris.
13. BALACHEFF, N. (1995). Conception, propriété du système sujet/milieu, in NOIRFALISE, R. PERRIN-GLORIAN, M.J. (eds.) *Actes de la VII° Ecole d'été de didactique des mathématiques* (pp.215-229), Clermont-Ferrand : IREM de Clermont-Ferrand.
14. BANDURA, A. (1971) *Social Learning Theory*, General Learning Press, New York.
15. BANDURA, A. (1986) *Social foundations ot Thought and Action, A Social Cognitive Theory*, Engelwood Cliffs, Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ.
16. BANG, V. (1989) Introduction, in A. GIORDAN, A. HENRIQUES et BANG, *Psychologie génétique et didactique des sciences,* Peter Lang, Berne.
17. BARKOW, J.H. COSMIDES, L. & TOOBY, J. eds. (1992) *The Adapted Mind : Evolutionary Psychology and the Generation of Culture*, Oxford University Press.
18. BARTH, B.-M. (1993) *Le savoir en construction*, Éditions Retz, Paris.
19. BEDNARZ, N. & GARNIER, C. (Ed.), (1989) *Construction des savoirs,* CIRADE et Agence D'ARC, Montréal.
20. BELLO, A. (2007) *Les falsificateurs*, Folio, Gallimard, Paris, 163-166.
21. BENSAUDE-VINCENT, B. (2009) *Les vertiges de la technoscience. Façonner le monde atome par atome*, La Découverte, Paris.

22. BEREITER, C. & SCARDAMALIA, M. (1989) Intentional learning as a goal of instruction, in L. B. RESNICK *et al.* (Eds), *Knowing, learning and instruction: essays in honor of Robert Glaser* (361–392). Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, NJ.
23. BEREITER, C. & SCARDAMALIA, M. (1993) *Surpassing ourselves: An inquiry into the nature and implications of expertise,* La Salle Ill, Open Court, Chicago.
24. BERGERON, A. (1990) *L'outil, concepts et méthodes pour la construction d'environnement d'apprentissage*, Télé-Université.
25. BERTHOZ, A. (1997) *Le sens du mouvement*, Odile Jacob, Paris.
26. BETY, M.-N. (2010) Pont théorique entre les principaux modèles de changement conceptuel et l'enseignement des sciences au primaire, *Canadian Journal for New Scholars in Education*, Vol. 3, *1*, june.
27. BINET, A. (1911) *Les idées modernes sur les enfants*, réédité en 1973 avec une préface de Jean PIAGET, Flammarion, Paris.
28. BITGOOD, S. SHETTEL, H.H. (1994) Les pratiques de l'évaluation des expositions : quelques études de cas, *Publics & Musées*, no 4, hors thème, Presses Universitaires de Lyon.
29. BLAKEMORE, S.J. & FRITH, U. (2005) *The Learning Brain. Lessons for Education,* Blackwell, Oxford.
30. BLANCHARD, A. (2011) Science blogs in research and popularization of science: why, how and for whom?, in COCKELL, M. BILLOTTE, J. DARBELLAY, F. & WALDVOGEL, F. (dir.), *Common Knowledge: The Challenge of Transdisciplinarity*, 219-232, EPFL Press, Lausanne.
31. BLAYE, A. (1989) Interactions sociales et constructions cognitives: présentation critique de la thèse du conflit socio-cognitif in *Constructions des savoirs*, sous la direction de Bednarz, N. & Garnier, C. CIRADE et Agence D'ARC, Montréal.
32. BLOOM, A. (1987) *L'Arme désarmée,* Juillard, Paris.
33. BLOOM, B. ENGELHART, M. HILL, M. FURST, E. & KRATHWOH, L.D. (1956) *Taxonomy of Educational Objectives, Handbook, Cognitive domain,* Longman, New York.
34. BONANGE, J.-B. (1998) De l'expression corporelle à la clownanalyse, *Art et thérapie*, n°28-29.
35. BONANGE, J.-B. (2000) Du travail du clown à la clownanalyse, *Le Joker – Documents n°2*, Le Bataclown.
36. BONANGE, J.-B. (2002) Le clown et sa fonction sociale : racines, signes et renouveau, *Le Joker – Documents n°3*, Le Bataclown.
37. BOTVINICK, M. & COHEN, J. (1998) Rubber hands 'feel' touch that eyes see [letter], *Nature, 391(6669), 756.*
38. BOURDEAULT, H. (2010) Comme un poisson dans l'eau, *Technigogie*, vol. 3, *1*, mai.
39. BOVET, P. (1992) Cognitive science and learning, in GIORDAN, A. GIRAULT, Y. *The new learning models*, Z'Editions, Nice.
40. BOZZI, P. (1998) *Fisica ingenua : studi di psicologia della percezione*, Garzanti, Milan.
41. BRAMALD, R. (2000) Introducing the empty number line: the Dutch approach to teaching number skills, *Education 3–13*, **28**, 5–12.
42. BRANDT, R. (1990) On cooperative learning: a conversation with Spencer Kagan, *Educational leadership*, 47, 4.
43. BRANSFORD, J. *et al.* (2006) *Learning Theories and Education: Toward a Decade of Synergy*, 209-245 *in* ALEXANDER P.A. WINNE P.H. (éd.). *Handbook of Educational Psychology,* Lawrence Erlbaum, Mahwah, NJ.
44. BRUER, J.T. (1993) *Schools for Thought : A Science of Learning in the Classroom,* MIT Press, Cambridge, MA.

45. BRUER, J.T. (1997) Education and the brain: a bridge too far, *Educ. Res.* 26, 4–16.
46. BRUER, J.T. (1999) *The Myth of the First Three Years: A New Understanding of Early Brain Development and Lifelong Learning*, The Free Press, New York.
47. BRUNER, J. (1986) *Actual Minds, Possible Worlds,* Harvard University Press, Cambridge.
48. BRUNING, R.H. SCHRAW, G.J. & RONNING, R.R. (1999) Cognitive Psychology and Instruction, Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ.
49. BUNICO, B. (1989) *Le merveilleux dans sa banalité*, Collection la Bourdevolle, Z'Editions, Nice.
50. BYRNES, J.P. (2001) *Minds*, *Brains and Learning*, Guilford Press, New York.
51. CAILLET, E. (1995) *A l'approche du musée, la médiation culturelle*, PUL, Lyon.
52. CANGUILHEM, G. (1968) *Etudes d'histoire et de philosophie des sciences*, Vrin, Paris.
53. CANTLON, J.F. PINEL, P. DEHAENE, S. PELPHREY, K.A. (2011) Cortical representations of symbols, objects, and Faces are Pruned back during early Childhood, *Cerebral cortex*, 21, 191-9.
54. CAREY, S. (1985) *Conceptual change in childhood*, MIT Press, Cambridge, MA.
55. CAREY, S. (1999) Sources of conceptual change, in SCHOLNICK, E.K. NELSON, K. & MILLER, P. (Eds.), *Conceptual development: Piaget's legacy*, Lawrence Erlbaum Associates, Mahwah, NJ, 293-326.
56. CARIOU, J.-Y. (2007) *Faire vivre des démarches expérimentales*, collection « Un projet pour… », Delagrave, Paris.
57. CARR, L. *et al.* (2003) Neural mechanisms of empathy in humans: a relay from neural systems for imitation to limbic areas. *Proc. Natl Acad. Sci. USA,* 100, 5497–5502.
58. CARUGATI, F. & MUGNY, G. (1985) La théorie du conflit socio-cognitif, dans Mugny G. (Ed.), *Psychologie sociale du développement cognitif*, Peter Lang, Berne.
59. CHAMPAGNE, A.B. GUNSTONE, R.F. & KLOPFER, L.E. (1985) Effecting changes in cognitive structures among physics students. In WEST, L. & PINES, A. (Eds.), *Cognitive Structure and Conceptual Change*, Academic Press, Orlando, FL, 163-188.
60. CHAPTAL, A. (2003) *L'efficacité des technologies éducatives dans l'enseignement scolaire. Analyse critique des approches française et américaine*, L'Harmattan, Paris.
61. CHARPAK, G. LENA, P. & QUERE, Y. (2005) *L'Enfant et la Science. L'aventure de La main à la pâte*, Odile Jacob, Paris.
62. CHI, M.T.H. (1992). Conceptual change in and across ontological categories: Examples from learning and discovery in science, in GIERE, R. (Ed.), *Cognitive models of science*, University of Minnesota Press, Minneapolis, MN, 129-160.
63. CHI, M.T.H. (2005) Commonsense conceptions of emergent processes: Why some misconceptions are robust. *The Journal of the Learning Sciences, 14*(2), 161-199.
64. CHINN, C.A. & BREWER, W.F. (1993). The role of anomalous data in knowledge acquisition: A theoretical framework and implications for science instruction. *Review of Educational Research*, 63(1), 1-49.
65. CHOMSKY, N. (1957) *Syntactic structures*, The Hague, Mouton.
66. CHOMSKY, N. (1979) *Théories du langage - Théories de l'apprentissage : le débat entre Jean Piaget et Noam Chomsky*, Seuil, Paris.
67. CHOMSKY, N. (2000) *The Architecture of language*, Oxford University Press.
68. CHOMSKY, N. (2005) *Nouveaux horizons dans l'étude du langage et de l'esprit*, trad. CREVIER, R. et KIHM, A. Stock, Paris.
69. CHRISTOPHE, A. sous la direction de ANDLER D. & GUERRY, B. (2008) Rôle des nouvelles technologies dans l'éducation : apports de la psychologie cognitive ? *Apprendre demain, sciences cognitives et éducation à l'heure du numérique*, Cap Digital Education, Editions Hatier, Paris.

70. CLAIDIERE, N. (2009) *Théories darwiniennes de l'évolution culturelle : modèles et mécanismes*, thèse de doctorat en ligne : www.nicolas.claidiere.fr/doctorat/theories-darwiniennes-de-levolution-culturelle-modeles-et-mecanismes.html - Dernière consultation le 11/02/2013.
71. CLARK, D.B. (2006) Longitudinal conceptual change in students' understanding of thermal equilibrium: An examination of the process of conceptual restructuring. *Cognition and Instruction, 24*(4), 467-563.
72. COHEN, I. & GOLDSMITH, M. (2000) *Hands On: How to Use Brain Gym[R] in the Classroom*, Hands On Books, Sea Point, South Africa.
73. COHEN, L. DEHAENE, S. VINCKIER, F. JOBERT, A. MONTAVONT, A. (2008) Reading normal and degraded words: contribution of the dorsal and ventral visual pathways. *NeuroImage*, 40, 353-366.
74. COLLET, B. EASTES, R.-E. & FAURY, M. (2009) La mise en scène du Système Périodique du Primo Levi : la science en culture, *Actes JIES XXX*, MARTINAND J.-L. & TRIQUET É. Chamonix.
75. COMPAS (groupe), sous la direction de ANDLER D. & GUERRY, B. (2007) *Apprendre demain. Sciences cognitives et éducation à l'ère numérique*, Cap Digital Education, Editions Hatier, Paris.
76. CONDILLAC (de), E.B. (1746) *Essai sur l'origine des connaissances humaines* in Œuvres complètes (1798, Paris).
77. CONDILLAC (de), E.B. (1754) *Traité des sensations* in Œuvres complètes (1798, Paris).
78. COQUEUGNIOT, H. HUBLIN, J.J. VEILLON, F. HOUET, F. & JACOB, T. (2004) Early brain growth in Homo erectus and implications for cognitive ability, *Nature* 431, 299–302.
79. COSGROVE, M. & OSBORNE, R. (1985). Lesson frameworks for changing children's ideas in OSBORNE, R. & FREYBERG, F. P. (Eds.), *Learning in Science: The Implications of Children's Science*, Heinemann, Portsmouth, NH, 101-111.
80. COUSINET, R. (1950) *L'éducation nouvelle*, Delachaux et Niestlé, Neuchâtel.
81. CSIBRA, G. & GERGELY, G. (2005) *Social learning and social cognition : The case for pedagogy*, *in* Johnson, M.H. & MUNAKATA Y. (éd.). *Processes of Change in Brain and Cognitive Development. Attention and Performance, XXI,* Oxford University Press.
82. DAURIGNAC, E. HOUDE, O. & JOUVENT, R. (2006) Negative priming in a numerical Piaget-like task as evidenced by ERP, *Journal of Cognitive Neuroscience*, 18, 730-736.
83. DAVIS, J. (2001) Conceptual Change, in OREY, M. (Ed.), *Emerging perspectives on learning, teaching, and technology* : http://projects.coe.uga.edu/epltt/ - Dernière consultation le 11/02/2013.
84. DAWKINS, R. (1989) *The selfish gene*, Oxford University Press.
85. DECROLY, O. & MONCHAMP (1937) *L'initiation à l'activité intellectuelle et motrice par les jeux éducatifs: contribution à la pédagogie des jeunes enfants et des irréguliers*, Delachaux et Niestlé, Neuchâtel.
86. DEFERNE, J. (1996) Vulgarisation scientifique et muséographie : comment concevoir une exposition ? *Musées et Médias*, sous la direction d'A. Giordan, Georg éditeur, Genève.
87. DEHAENE, S. (1997a) *Le Cerveau en action. L'imagerie cérébrale en psychologie cognitive*. Presses Universitaires de France, Paris.
88. DEHAENE, S. (1997b) *La bosse des maths*. Odile Jacob, Paris.
89. DEHAENE, S. (2003) Les bases naturelles d'une acquisition culturelle: la lecture, *in* CHANGEUX, J.-P. *Gènes et cultures*, Odile Jacob, Paris.
90. DEHAENE, S. (2005) Evolution of human cortical circuits for reading and arithmetic: The ''neuronal recycling'' hypothesis, in *From Monkey Brain to Human Brain*, DEHAENE, S. DUHAMEL, J.R. HAUSER, M. and RIZZOLATTI, G. eds. Cambridge, MA: MIT Press, 133–157.
91. DEHAENE, S. (2007) *Les Neurones de la lecture*, Odile Jacob, Paris.

92. DEHAENE, S. PEGADO, F. BRAGA, L.W. VENTURA, P. FILHO, G.N. JOBERT, A. DEHAENE-LAMBERTZ, G. KOLINSKY, R. MORAIS, J. COHEN, L. (2010) How learning to read changes the corticalnetworks for vision and language, *Science*, 6009, 1359-1364.

93. DEHAENE, S. BOSSINI, S. & GIRAUX, P. (1993) The mental representation of parity and numerical magnitude, *Journal of Experimental Psychology,* General, 122, 371-396.

94. DEHAENE, S. & COHEN, L. (2007) Cultural recycling of cortical maps, *Neuron*, 56, october 25.

95. DEHAENE, S. COHEN, L. SIGMAN, M. & VINCKIER, F. (2005) The neural code for written words: a proposal, *Trends Cogn. Sci.* 9, 335–341.

96. DEHAENE, S. IZARD, V. SPELKE, E. & PICA, P. (2008) Log or Linear ? Distinct intuitions of the number scale in western and Amazonian indigene cultures, *Science*, 320, 1217-1220.

97. DEHAENE, S. & NACCACHE, L. (2001) Towards a cognitive neuroscience of consciousness: Basic evidence and a workspace framework, *Cognition* 79, 1–37.

98. DEHAENE, S. PIAZZA, M. PINEL, P. & COHEN, L. (2003) Three parietal circuits for number processing. *Cognitive Neuropsychology, 20*, 487-506.

99. DEHAENE, S. SPELKE, L. PINEL, P. STANESCU, R. & TSIVKIN, S. (1999) Sources of mathematical thinking: behavioral and brain-imaging evidence, *Science,* 284, 970-974.

100. DEVELAY, M. (1998) De l'impossible et de la nécessaire pensée du transfert in *Educations*, n° 15.

101. DEWEY, J. (1897) My pedagogic creed, *School Journal*, 54, 77-80.

102. DEWEY, J. (1947) *L'école et l'enfant*, Delachaux et Niestlé, Neuchatel.

103. DIAMOND, A. (1991) Neuropsychological insights into the meaning of object concept development, *in* CAREY, S. & GELMAN, R. (Eds), *The epigenesis of mind : Essays on biology and cognition*, Hillsdale, NJ, Lawrence Erlbaum, 67-110.

104. DICK, W. & CAREY, L. (1990) *The Systematic Design of Instruction,* 2e édition, Scott Foresman, Glenview.

105. DISESSA, A.A. (1993) Towards an epistemology of physics. *Cognition and instruction, 10* (2 et 3), 105-225.

106. DISESSA, A.A. GILLESPIE, N. & ESTERLY, J. (2004) Coherence versus fragmentation in the development of the concept of force. *Cognitive Science, 28*, 843-900.

107. DOISE, W. & MUGNY, G. (1981) *Le développement social de l'intelligence,* Interéditions, Paris.

108. DOUADY, S. (2002) Ce chant venu des dunes, *Journal du CNRS*, **153-154**.

109. DREYFUS, A. JUNGWIRTH, E. & ELIOVITCH, R. (1990) Applying the "cognitive conflict" strategy for conceptual change: Some implications, difficulties, and problems, *Science Education*, 74, 555-569.

110. DUIT, R. & TREAGUST, D. (2003) Conceptual change: a powerful framework for improving science teaching and learning, *Int. J. Sci. Educ.* 2003, vol. 25, 6, 671–688.

111. DUIT, R. (1999) Conceptual change approaches in science education, in SCHNOTZ, W. VOSNIADOU, S. & CARRETERO, M. (Eds.), New Perspectives on Conceptual Change, Pergamon, Oxford, 263-282.

112. EASTES, R.-E. (2002) De l'utilisation de l'expérience contre intuitive, *Lettre des sciences chimiques du CNRS*, n° 78, dec.

113. EASTES, R.-E. (2003) De l'utilisation de l'expérience contre intuitive, *Journal de la Société ouest-africaine de chimie*, n°15, juin.

114. EASTES, R.-E. (2004) Contribuer au partage de la culture scientifique, *Numéro Spécial Médiation de la chimie*, L'actualité Chimique, nov-déc. 2004.

115. EASTES, R.-E. (2009) Entrée « Cognition » in *Dictionnaire Dixel*, Le Robert, Paris.

116. EASTES, R.-E. (2011 a) Chimie en société : réapprendre à communiquer pour durer, sous la direction de MAXIM, L. *La chimie durable : au-delà des promesses…* CNRS éditions, Paris.

117. EASTES, R.-E. (2011 b) Chimie et société : les origines de la défiance, *l'Actualité Chimique*, 355, sept.
118. EASTES, R.-E. (2011 c) *Vers une agriculture choisie*, le Cavalier Bleu, Paris.
119. EASTES, R.-E. (sous la direction de) (2011d) *La science en culture : le détour par l'art*, Editions *Les Atomes Crochus*, Paris.
120. EASTES, R.-E. & PELLAUD, F. (2002) Surprendre, *Cahiers pédagogiques*, n° 409, dec.
121. EASTES, R.-E. & PELLAUD, F. (2003) L'expérience contre intuitive : un outil au service de l'apprendre ? *L'Actualité Chimique*, n° 262, mars 2003, p. 23-26.
122. EASTES, R.-E. & PELLAUD, F. (2004 a) Des modèles pour comprendre l'apprendre : de l'empirisme au modèle allostérique, *Gymnasium Helveticum*, n°5/04, p.10-14.
123. EASTES, R.-E. & PELLAUD, F. (2004 b) Un outil pour apprendre : l'expérience contre intuitive, *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 866, juil.-août-sept. 2004, p. 1197-1208.
124. EASTES, R.-E. & PELLAUD, F. (2004 c) L'expérience contre intuitive, annexe expérimentale, *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 866, juil.-août-sept. 2004.
125. EASTES, R.-E. & PELLAUD, F. (2004 d) Comment "déconceptualiser les sciences" ou les vertus de "l'approche phénoménologique", Actes JIES 2003, GIORDAN, A. MARTINAND, J.-L. RAICHVARG, D. Chamonix.
126. EASTES, R.-E. & PELLAUD, F. (2004 e) Passée la porte du laboratoire… *Numéro Spécial Médiation de la chimie*, L'actualité Chimique, nov-déc. 2004.
127. EASTES, R.-E. & PELLAUD, F. (2005) Un modèle pour comprendre l'apprendre : le modèle allostérique, *Gymnasium Helveticum*, janvier 2005, n° 01/05.
128. EASTES, R.-E. & PELLAUD, F. (2006) De la physique naïve à l'approche phénoménologique : un apport des sciences cognitives à la médiation scientifique, *Cahiers Pédagogiques* N° 443, mai 2006.
129. EASTES, R.-E. & PELLAUD, F. (2008) sous la direction de ANDLER D. & GUERRY, B. Vers une école 2.0 ? De nouveaux paradigmes pour la pédagogie : TICE, modèles didactiques et sciences cognitives in *Apprendre demain, sciences cognitives et éducation à l'heure du numérique*, Cap Digital Education, Editions Hatier, Paris.
130. EASTES, R.-E. & PELLAUD, F. (2010 a) Le clown, le scientifique et l'enfant : la pratique des Atomes Crochus, *Le clown / Les clowns, archétype et diversité*, Culture Clown, 17, oct.
131. EASTES, R.-E. & PELLAUD, F. (2010 b) The Child, the Clown and the Scientist, *Current Challenges in Basic Science Education*, Unesco, 101 pages.
132. EASTES, R.-E. & PELLAUD, F. (2011 a) L'enfant, le clown et le scientifique, *La science en culture : le détour par l'art*, sous la direction de EASTES, R.-E., Editions *Les Atomes Crochus*, Paris.
133. EASTES, R.-E. & PELLAUD, F. (2011 b) Prendre la science en conte, *La science en culture : le détour par l'art*, sous la direction de EASTES, R.-E., Editions *Les Atomes Crochus*, Paris.
134. EVANS, M.G. & POLANYI, M. (1935) Some applications of the transition state method to the calculation of reaction velocities, especially in solution, *Trans. Faraday Soc.*, 31, 875-894.
135. EYRING, H. (1935) The activated complex in chemical reactions, *Journal of Chemical Physics*, 3, 107-115.
136. FENELON, F. (1687) *De l'éducation des filles*, Édition des *Œuvres complètes*, tome V, J. Leroux et Jouby, Paris.
137. FENSHAM, P. (2001) Science content as problematic – Issues for research. In H. BEHRENDT, H. DAHNCKE, R. DUIT, W. GRÄBER, M. KOMOREK, A. KROSS & P. REISKA, Eds., *Research in science education – Past, present, and future*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 27–41.
138. FOUREZ, G. (2003) *Apprivoiser l'épistémologie*, Editions De Boek, Bruxelles.

139. FRACKOWIAK, R.S.J. MAGUIRE, E.A. & FRITH, C.D. (1997) Recalling Routes around London : Activation of the Right Hippocampus in Taxi Drivers, Journal of neuroscience, Vol. 17, N° 18, September 15, 7103-7110.
140. FREINET, C. (1956) *Les méthodes naturelles dans la pédagogie moderne*, Bourrelier éditions, Paris.
141. FREIRE, P. (1974) *Education of Critical Consciousness*, Sheed & Ward, Londres.
142. FREUD, S. (1916) *Introduction à la psychanalyse*, Petite bibliothèque Payot, Payot, Paris.
143. GAALOUL, B. (2007) La science près de chez vous ! *Sciences mag IDF*, Réseau des bars des sciences franciliens, N° 0.
144. GAGNE, R.M. (1965) *The condition of learning*, Holt, Rhinehart & Wiston, New York.
145. GAGNE, R.M. (1976) *Les principes fondamentaux de l'apprentissage, application à l'enseignement*, HRW, Montréal.
146. GAILLARD, R. NACCACHE, L. PINEL, P. CLEMENCEAU, S. VOLLE, E. HASBOUN, D. DUPONT, S. BAULAC, M. DEHAENE, S. ADAM, C. & COHEN, L. (2006). Direct intracranial, FMRI, and lesion evidence for the causal role of left inferotemporal cortex in reading, *Neuron* 50, 191–204.
147. GÄRDENFORS, P. (éd.) (1992) *Belief Revision*, 183-203, Cambridge University Press.
148. GARDNER, H. (1993) *Frames of Mind – The Theory of Multiple Intelligences,* New York, Basic Books, trad. Fr. (nouv. Ed. 2004) *Les Intelligences multiples,* Retz, Paris.
149. GARDNER, H. (2e éd. 1987) *The Mind's New Science. A History of the Cognitive Revolution,* New York, Basic Books, trad. Fr. Peytavin, J.-L. (1993) *Histoire de la révolution cognitive. La nouvelle science de l'esprit,* Payot, Paris.
150. GAUME, N. sous la direction de ANDLER D. & GUERRY, B. (2008) Ce que les jeux vidéo nous apprennent, *Apprendre demain, sciences cognitives et éducation à l'heure du numérique*, Cap Digital Education, Editions Hatier, Paris.
151. GELUCK (1999) Le chat 1999,9999, Casterman, Paris.
152. GEORHIADES, P. (2000) Beyond conceptual change learning in science education : focusing on transfer, durability and metacognition. *Educational Research*, 42(2), 119–139.
153. GILBERT, C.D. SIGMAN, M. & CRIST, R.E. (2001) The neural basis of perceptual learning. *Neuron* 31, 681–697.
154. GILBERT, J.K. OSBORNE, R.J. & FENSHAM, P. (1982) Children's science and its implications for teaching, *Science Education*, 66, 625–633.
155. GILLY, M. (1989) À propos de la thèse du conflit socio-cognitif et des mécanismes psycho-sociaux des constructions cognitives : perspectives actuelles et modèles explicatifs, dans Bernarz, N. Garnier, C. (Ed.), *Construction des savoirs*, 62, CIRADE et Agence D'ARC, Montréal.
156. GILMORE, C. MCCARTHY, S. & SPELKE, E. (2007) Symbolic arithmetic knowledge without instruction, *Nature*, *477.*
157. GIORDAN, A. (1978) *Une pédagogie pour les sciences expérimentales*, Centurion, Paris.
158. GIORDAN, A. (1986) *Histoire de la Biologie*, Tome 1, Lavoisier, Paris.
159. GIORDAN, A. (1987) *Histoire de la Biologie*, Tome 2, Lavoisier, Paris.
160. GIORDAN, A. (sous la direction de) (1986), *L'éducation relative à l'environnement, principes d'enseignement et d'apprentissage*, UNESCO-PNUE, Paris.
161. GIORDAN, A. (1989) An allosteric learning model, article présenté au meeting de Sydney, *Actes IUBS-CBE*, 1988, révisé au meeting de Moscou, Actes IUBS-CBE.
162. GIORDAN, A. (1991). La modélisation dans l'enseignement et la vulgarisation des sciences. *Impact : science et société*, 41(4), 337-355.
163. GIORDAN, A. (1994) Enseigner n'est pas apprendre, *Résonances* no 1.

164. GIORDAN, A. (1996 a) Nouveaux modèles pour sensibiliser et apprendre : conséquences sur les musées des sciences et des techniques, *Musées et Médias*, sous la direction d'A. Giordan, Georg éditeur, Genève.
165. GIORDAN, A. (1996 b) Représentations et conceptions, *Représentations et conceptions en didactique*, Regards croisés sur les STAPS sous la dir. De J-P. Clément, CIRID/CRDP d'Alsace, p. 15.
166. GIORDAN, A. (1998) *Apprendre !* Belin, Paris.
167. GIORDAN, A. (2004) L'apport de la didactique des sciences à la vulgarisation scientifique, Numéro Spécial Médiation de la chimie, *L'actualité Chimique*, nov-déc. 2004.
168. GIORDAN, A. (2010), *Le modèle allostérique : une nouvelle approche pour les recherches sur l'apprendre*, Educational Science Publishing House, Shanghai.
169. GIORDAN, A. & GIRAULT, Y. (éd) (1996) *New learning models*, Z'éditions, Nice.
170. GIORDAN, A. & GIRAULT, Y. (1992) Un environnement pédagogique pour apprendre, le modèle allostérique, *Repères*, 14, Université de Montréal, 95–124.
171. GIORDAN, A. & MARTINAND, J-L. (1988) Etat des recherches sur les conceptions des élèves en biologie, *Annales de Didactiques des sciences*, Giordan et Martinand éd., Paris.
172. GIORDAN, A. & PELLAUD, F. (2004) La place des conceptions dans la médiation de la chimie, Numéro Spécial Médiation de la chimie, *L'actualité Chimique*, nov-déc. 2004.
173. GIORDAN, A. & PELLAUD, F. (2008) *Comment enseigner les sciences, Manuel de pratiques*, Delagrave, Paris.
174. GIORDAN, A. & SALTET, J. (2007) *Apprendre à apprendre*, Librio, Paris.
175. GIORDAN, A. & SOUCHON, C. (2008) *Une éducation pour l'environnement, vers un développement durable*, Delagrave, Paris.
176. GIORDAN, A. & VECCHI, G. (de) (1987) *Les origines du savoir*, Delachaux, Neuchâtel.
177. GOLAY, A. LAGGER, G. & GIORDAN, A. (2007) Motivating patient with chronic diseases, *Journal of Medicine and the Person*.
178. GOLAY, A. LAGGER, G. & GIORDAN, A. (2009) Comment motiver le patient à changer, Maloine, Paris.
179. GOLEMAN, D. (1997) *L'intelligence émotionnelle : comment transformer ses émotions en intelligence*, Robert Laffont, Paris.
180. GOSWAMI, U. (2006) Neuroscience and education : from research to practice ? *Nature Reviews Neuroscience*, AOP, published online 12 april 2006.
181. GOULD, S.J. & VRBA, E.S. (1982) Exaptation : A missing term in the science of form, *Paleobiology* 8, 4–15.
182. GUICHARD, J. (1990) *Diagnostic didactique pour la production d'un objet muséologique*, thèse de doctorat, Université de Genève.
183. GUICHARD, J. (1993) La prise en compte du visiteur comme outil de la conception muséologique : un exemple concret, la Cité des enfants, *Publics & Musées*, no 3, PUL, Lyon.
184. HAGUENAUER, C. (1996) Frame of reference of concepts within the evolving reading frame from the exemple of cycle in biology in *The new learning models*, Ed. GIORDAN & GIRAULT, Z'éditions, Nice.
185. HANSSON, S.O. (2003) Ten philosophical problems in belief revision, *Journal of logic and computation*, 13.
186. HARMON, W. (1970) *An Incomplete Guide to the Future*, Norton, New York, W. W.
187. HARRISON, A.G. & TREAGUST, D.F. (2000) Learning about atoms, molecules and chemical bonds : A case-study of multiple model use in grade-11 chemistry. *Science Education*, 84, 352–381.
188. HARRISON, A.G. GRAYSON, D.J. & TREAGUST, D.F. (1999) Investigating a grade 11 student's evolving conceptions of heat and temperature. *Journal of Research in Science Teaching, 36*(1), 55-87.

189. HEWITT, P. (2002) *Touch this ! Conceptual physics for everyone*, Addison-Wesley, Boston.

190. HEWSON, P.W. BEETH, M.E. & THORLEY, N.R. (1998) Teaching for conceptual change, in TOBIN, K.G. & FRASER, B.J. (Eds.), *International Handbook of Science Education*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 199-218.

191. HIGGINS, E.T. (1996) Knowledge activation : Accessibility, applicability, and salience, *in* HIGGINS, E. T. & KRUGLANSKI, A. (Eds.), *Social psychology : Handbook of basic principles*, New York : Guilford Press, 133–168.

192. HOLLAND, J.G. & SKINNER, B.F. (1961) *The analysis of behavior*, Mac Graw Hill, New York.

193. HOLLAND, J.G. HOLYOAK, K.J. NISBETT, R.E. & THAGARD, P.R. (1987) *Induction, Processes of inference, Learning, and Discovery*, MIT press, Cambridge.

194. HOLLOWAY, I.D. & ANSARI, D. (2008) Mapping numerical magnitudes onto symbols : The numerical distance effect and individual differences in children's mathematics achievement. *J Exp Child Psychol*.

195. HONOREZ, M. REMY, F. MONFORT, B. CAHAY R. & THERER, J. (2000) L'acquisition des compétences terminales en sciences. Recherche-action sur la construction de séquences didactiques axées sur le modèle allostérique de Giordan, *Informations pédagogiques*, 50, 9-27.

196. HOSSON, C. (de) & KAMINSKI, W. (2007). Historical controversy as an educational tool. Evaluating elements of a teaching-learning sequence conducted with the « dialogue on the way that vision operates », *International Journal of Science Education*, 29 [5], 617-642.

197. HOST, V. & MARTINAND, J.-L. (1975) *Activités d'éveil scientifique à l'école élémentaire, initiation physique et technologie*, INRP, Paris.

198. HOUDE, O. (1995) *Rationalité, développement et inhibition,* PUF, Paris.

199. HOUDE, O. (1997) Erreur « A-non-B », inhibition et cortex préfrontal : une articulation des analyses, *Revue de neuropsychologie*, 6, 329-346.

200. HOUDE, O. (1998) Activation/inhibition, *in* HOUDE, O. KAYSER, D. KOENIG, O. PROUST, J. & RASTIER, F. (Eds), *Vocabulaire des sciences cognitives,* PUF, Paris, 39-42.

201. HOUDE, O. (1999) Attention sélective, développement cognitif et contrôle inhibiteur de l'information. Ln G. Netchine-Grynberg (Ed.), *Développement et fonctionnement cognitifs : Vers une intégration*, PUF, Paris, 181-195.

202. HOUDE, O. (2004) *La psychologie de l'enfant,* Que sais-je ? PUF, Paris.

203. HOUDE, O. (2009) Les enfants prêtent leur cerveau à la science, *La Recherche,* Portfolio pour Les Dossiers de *la Recherche* : « L'intelligence », n°34, 60-67.

204. HOUDE, O. MAZOYER, B. & TZOURIO-MAZOYER, N. (Eds.) (2002) *Cerveau et psychologie : Introduction à l'imagerie cérébrale anatomique et fonctionnelle*, PUF, Paris.

205. HOUDE, O. & TZOURIO-MAZOYER, N. (2003) Neural foundations of logical and mathematical cognition, *Nature Reviews Neuroscience*, 4, 507, 2003.

206. HOUSSAYE, J. (1987) *École et vie active, Résister ou s'adapter ?,* Delachaux et Niestlé, Paris.

207. HOUSSAYE, J. (1994) *Quinze pédagogues. Leur influence aujourd'hui*, Armand Colin, Paris.

208. ILLICH, I. (1970) *Deschooling Society,* Harper & Row, New York.

209. INHELDER, B.L. (1966) Développement, régulation et apprentissage, *Psychologie et épistémologie génétique* (Thèmes piagétiens), Dunod, Paris.

210. IOANNIDES, C. & VOSNIADOU, S. (2002) The changing meaning of force. *Cognitive Science Quarterly, 2*, 5-61.

211. JACQUES, J. & RAICHVARG, D. (1991) *Savants et ignorants : une histoire de la vulgarisation des sciences*, Seuil, Paris.

212. JEAN, G. (1976) *Pour une pédagogie de l'imaginaire*, Collection "Orientations E/3", Casterman, Paris, p. 24
213. JOHNSON, D. & JOHSON, R. (1990) Social Skills for Successful Group Work, *Educational Leadership,* 47, 4, 29-33.
214. JOHSUA S. & DUPIN J.-J. (1993) *Introduction à la didactique des sciences et des mathématiques*, PUF, Paris.
215. JOULE, R. V. & BEAUVOIS, J.-L. (2002) *Petit traité de manipulation à l'usage des honnêtes gens*, éditions Presses Universitaires de Grenoble.
216. JOURNET, N. (2006) Euclide en Amazonie, *Sciences Humaines*, n° 172, juin.
217. JOYCE, B. WEIL, M. & CALHOUN, E. (2003). *Models of teaching* (7th ed.), Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
218. JULIA, M. (1963) *Mécanismes électroniques en chimie organique*, Gauthier Villars, Paris.
219. JUNG, W. (1993) Hilft die Entwicklungspsychologie dem Physikdidaktiker [Does developmental psychology help the physics educator ?], in R. DUIT & W. GRABER (Eds.), *Kognitive Entwicklung und naturwissenschaftlicher Unterricht*, IPN – Leibniz Institute for Science Education, Kiel, 86–107.
220. JURDANT, B. (2000) Le désir de scientificité, *Alliage*, Hiver 99-Printemps 2000, n° 41-42, pp 147-155.
221. KAGAN, S. (1990) The Structural Approach to Cooperative Learning, *Educational Leadership,* 47, 4, 12-15.
222. KAHNEMAN, D. (2002) *Maps of bounded rationality : a perspective on intuitive judgment and choice*, Prize Lecture, December 8.
223. KAHNEMAN, D. & FREDERICK, S. (2002) Representativeness revisited : Attribute substitution in intuitive judgment, *in* GILOVICH, T. GRIFFIN, D. & KAHNEMAN, D. (Eds.), *Heuristics and Biases,* Cambridge University Press, New York, 49-81.
224. KAHNEMAN, D. SLOVIC, P. & TVERSKY, A. (1982) *Judgment Under Uncertainty : Heuristics and Biases*, Cambridge University Press.
225. KAHNEMAN, D. & TVERSKY, A. (1979) *Prospect Theory : An Analysis of Decision under Risk*, Econometrica, XLVII, 263-291.
226. KANT, I. (1781/1921) *Traité de pédagogie*, Alcan, Paris.
227. KAPFERER, J.N. (1983) Comprendre le processus de choix des consommateurs pour mieux l'influencer, sous la direction de PIQUET, S. *La publicité, nerf de la communication*, éd. D'organisation, Paris.
228. KEARSLEY, G. (1987) *Artificial Intelligence and Instruction*, Addison Wesley, Boston.
229. KIRSCH, M. (2008), sous la direction de Andler D. & Guerry, B. La pédagogie appuyée sur des preuves, un cadre pour les relations entre l'École, les sciences et les technologies in *Apprendre demain, sciences cognitives et éducation à l'heure du numérique*, Cap Digital Education, Editions Hatier, Paris.
230. KIRSCHENBAUM, H. HENDERSON, V.L. & ROGERS, C. (1989) *Dialogues*, Houghton Mifflin, Boston.
231. KRATHWOHL, D. (1964) *Taxonomy of Educational Objectives*, Handbook 2 : Affective Domain, McKay.
232. KRUBITZER, L. & KAHN, D.M. (2003). Nature versus nurture revisited : an old idea with a new twist, *Prog. Neurobiol*. 70, 33–52.
233. KUHN, T. (1970) *La structure des révolutions scientifiques*, Flammarion, Paris.
234. LACHMANN, T. & VAN LEEUWEN, C. (2007) Paradoxical enhancement of letter recognition in developmental dyslexia, *Dev. Neuropsychol*. 31, 61–77.

235. LAGGER, G. GIORDAN, A. CHAMBOULEYRON, M. & LASSERRE-MOUTET, A. (2008) Education thérapeutique – 2e partie : Mise en pratique des modèles en 5 dimensions, *Médecine*, 4, 6, 269-73.
236. LAKATOS, I. (1976) *Proofs and Refutations*. Cambridge University Press.
237. LAMOUREUX, A. (2000) *Recherche et méthodologie en sciences humaines*, Beauchemin, Montréal.
238. LANDA, L.N. (1974) *Algorithmization in Learning and Instruction,* Educational Technology Publications, Englewood Cliffs.
239. LAPOINTE, J. (1990) *Une métavision du processus de la technologie de l'éducation*, Université de Laval.
240. LAVE, J. (1988) *Cognition into Practice*, Cambridge, Boston MA.
241. LAWLER, R.W. (1987) Learning environment: now, then and some day in LAWLER R.W. *et al.* (Ed.), *Artificial intelligence and education*, Ablex , Norwood.
242. LE MAREC, J. (1998) Repenser la relation du musée à son public? *La Révolution de la muséologie des sciences*, sous la dir. de Schiele & Koster, Multimondes, Québec.
243. LEIBNIZ, G.W. (1704) *Nouveaux essais sur l'entendement humain*.
244. LEMER, C. DEHAENE, S. SPELKE, E. & COHEN, L. (2003) Approximate quantities and exact number words : Dissociable systems. *Neuropsychologia, 41*, 1942-1958.
245. LENNEBERG, E. (1967) *Biological foundations of language,* Wiley, New York.
246. LEROUX, G. JOLIOT, M. DUBAL, S. MAZOYER, B. TZOURIO-MAZOYER, N. & HOUDE, O. (2006) Cognitive inhibition of number/length interference in a Piaget-like task: Evidence from ERP and fMRI, *Human Brain Mapping*, 27, 498-509.
247. LIMON, M. (2001) On the cognitive conflict as an instructional strategy for conceptual change: a critical appraisal. *Learning and Instruction*, 11, 357–380.
248. LINN, M.C. EYLON, B. & DAVIS, E.A. (2004) The Knowledge Integration Perspective on Learning, *in* LINN, M.C. DAVIS, E.A. & BELL, P. (Eds.), *Internet environments for science education*, Lawrence Erlbaum Associates, Mahwah, NJ.
249. LOBROT, M. (1972) *La pédagogie institutionnelle*, Paris.
250. LOCKARD, J. ABRAMS, P. & MANY, W. (1990) *Microcomputers for Educators*, 2e, Scott Foresman/Little, Brown, Glenview.
251. LOCKE, J. (1693) *Essai sur l'entendement humain*, traduction donnée par Yahoo! Encyclopédie.
252. MACMILLAN, M. (1996) The concept or inhibition in some nineteenth century theories of thinking, *Brain and Cognition*, 30, 4-19.
253. MAGER, R. (1962, *Preparing objectives for programmed instruction*, Fearon Publishers, Upper Saddle River.
254. MARQUET, A. (2002) La Commission Chimie et Société, *Lettres des sciences chimiques du CNRS*, janvier 2002.
255. MARTINAND, J.L. (1986) *Connaître et transformer la matière ; des objectifs pour l'initiation aux sciences et techniques*, Peter Lang, Berne.
256. MATHE, S. MEHEUT, M. & HOSSON, C. (de) (2008) La démarche d'investigation au collège : quels enjeux. *Didaskalia*, vol. 32, 41-76.
257. MATTHEWS, M. (1993) Constructivism and science education: Some epistemological problems. *Journal of Science Education and Technology*, 2, 359–369.
258. MCCRINK, K. & WYNN, K. (2004) Large-number addition and subtraction by 9-monthold infants, *Psychol Sci*, 15(11), 776-781.
259. MCLEAN, L. (1988) Achievement Measures Made Relevant to Pedagogy, *McGill Journal of Education,* 23 (3).

260. MEIRIEU, P. & TARDIF, J. (1998) Le transfert: réalités et illusions, *Educations*, n° 15.

261. MEIRIEU, P. (1998) Le transfert de connaissances, un objet énigmatique, *Educations*, n° 15.

262. MEIRIEU, P. (2001) Le paradoxe de l'apprentissage in *Eduquer pour former*, coord. Ruano-Borbalan, Ed. Sciences humaines, Auxerre.

263. MESTRE, J.P. (1994) Cognitive aspects of learning and teaching science, in FITZSIMMONS, S.J. & KERPELMAN, L.C. (Eds.), Teacher Enhancement for Elementary and Secondary Science and Mathematics: Status, Issues, and Problems (3-1 & 3-53), National Science Foundation, Washington.

264. MIALARET, G. (1958) Alfred Binet et la pédagogie expérimentale, *Bulletin de la Société libre pour l'étude, psychologique de l'enfant*, N° 500.

265. MIALARET, G. (2006) *Sciences de l'éducation*, PUF, Col. Quadrige, Paris.

266. MOLKO, N. CACHIA, A. RIVIERE, D. MANGIN, J.F. BRUANDET, M. LEBIHAN, D. *et al.* (2004) Brain Anatomy in Turner Syndrome: Evidence for Impaired Social and Spatial-Numerical Networks. *Cereb Cortex*.

267. MONOD, J. WYMAN, J. & CHANGEUX, J.-P. (1965) On the nature of allosteric transitions: a plausible model, *Journal of Molecular Biology*, May: 12, 88-118.

268. MONTESSORI, M. (1916) *Pédagogie scientifique*, tome I et II, Larousse, Paris.

269. MONTESSORI, M. (1958) *Pédagogie scientifique, La maison des enfants*, Desclée de Brouwer, Paris (7ème édition).

270. MOORE, M.K. & MELTZOFF, A.N. (1978) Imitation, object permanence and language development in infancy : towards a neo-Piagetian perspective on communicative and cognitive development, in MINIFIE F.D. & LOYD L.L. (Eds), *Commuicative and cognitive abilities : early behavioral assessment*, University Park Press, Baltimore.

271. MORAIS, J. & KOLINSKY, R. (2005) *Literacy and cognitive change. In The Science of Reading, A. Handbook*, M. Snowling & C. Hulme eds. Blackwell, Oxford, 188–203.

272. MORIN, E. (2002) *Dialogue sur la connaissance (Entretiens avec des lycéens)*, Editions de l'Aube, La Tour-d'Aigues.

273. MORGENSZTERN, A. (1983) Une synthèse des travaux sur la mémorisation des messages publicitaires, sous la direction de PIQUET, S. *La publicité, nerf de la communication*, éd. d'organisation, Paris.

274. MOSCOVICI, S. (1961) *La psychanalyse, son image et son public*, PUF, Paris.

275. MOUTIER, S. PLAGNE, S. MELOT, A.-M. & HOUDE, O. (2006) Syllogistic reasoning and belief-bias inhibition in school children, *Developmental Science*, 9, 166-172.

276. MURIS, P. MERCKELBACH, H. & DAMSMA, E. (2000) Threat perception bias in nonreferred, socially anxious children. *J. Clin. Child Psychol*. 29, 348–359.

277. NIEDER, A. & MERTEN, K. (2007) A labeled-line code for small and large numerosities in the monkey prefrontal cortex. *J Neurosci, 27*(22), 5986-5993.

278. NIEDER, A. (2005) Counting on neurons : the neurobiology of numerical competence. *Nat Rev Neurosci, 6*(3), 177-190.

279. NORMAN, D.A. (1999) *Affordances, conventions and design*, Interactions, vol. VI.3. May-June, 38-42.

280. NUSSBAUM, J. & NOVICK, N. (1982) Alternative frameworks, conceptual conflict, and accommodation: Toward a principled teaching strategy, *Instructional Science,* 11, 183-200.

281. OSBORNE, R. & WITTROCK, M. (1985) The generative learning model and its implications for science education, *Studies in science education*, vol. 12, issue 1, 59-87.

282. ÖZDEMIR, G. & CLARK, D.B. (2007) Eurasia Journal of Mathematics, *Science & Technology Education*, 3(4), 351-361.

283. PAPERT, S. (1981) *Mindstorm: Children, Computers and Powerful Ideas,* Basic Books, New York. 1980, Trad. française: *Jaillissement de l'esprit*, Flammarion, Paris.
284. PARE, A. (1977) *Créativité et pédagogie ouverte*, Éditions MHP, Laval.
285. PASQUINELLI, E. (2008) *Blog du groupe Compas :* http://compas.risc.cnrs.fr/ - Dernière consultation le 11/02/2013.
286. PASQUINELLI, E. (2012) Neuromyths: Why do they exist and persist? *Mind, brain and education*, vol. 6, 2, pp. 89-96, june.
287. PAULESU, E. *et al.* (2001) Dyslexia: cultural diversity and biological unity. *Science* 291, 2165–2167.
288. PELLAUD, F. (2000) *L'utilisation des conceptions du public lors de la diffusion d'un concept complexe, celui de développement durable, dans le cadre d'une présentation muséologique*, thèse de doctorat, Université de Genève.
289. PELLAUD, F. (2002) Pédagogie à la carte in *Apprendre le cheval autrement*, actes du colloque de novembre 2001, Ecole Nationale d'Equitation, Belin, Paris.
290. PELLAUD, F. (2002) *Une histoire des pédagogies*, document de travail LDES.
291. PELLAUD, F. (2011) *Pour une éducation au développement durable*, collection Essais, Quae, Versailles.
292. PELLAUD, F. & EASTES, R.-E. (2003) The importance on "presenting" knowledge: The role of the teaching environment in the Allosteric Learning Model in *Actes du Hawaii international conference on social sciences*, Honolulu.
293. PELLAUD, F. & EASTES, R.-E. COLLET, B. SENE, N. (2007 a) Prendre la science en conte… *Réalités industrielles, Annales des Mines*, numéro spécial Partage des savoirs scientifiques et techniques, mai, éd. ESKA, Paris, p. 95-103.
294. PELLAUD, F. & EASTES, R.-E. MUTHS, D. (2007 b) Prendre la science en conte… *Grand N*, n° 80, IREM de Grenoble.
295. PELLAUD, F. & GIORDAN, A, (2004) Une étude de conceptions en liaison avec les savoirs complexes : le cas du développement durable, *Didaskalia*, janvier.
296. PELLAUD, F. & GIORDAN, A. (2002) Faut-il encore enseigner les sciences ? *L'Actualité Chimique*, juillet 2002.
297. PELLAUD, F. GIORDAN, A. & EASTES, R.-E. (2007) Développement Durable : vers de nouveaux paradigmes scolaires, *Chemins de Traverse*, décembre 2007.
298. PERRET-CLERMONT, A.N. (1979) *La construction de l'intelligence dans l'interaction sociale*, Peter Lang, Berne.
299. PESTALOZZI, J.H. in COMPAYRE, G. (1901) *Histoire de la pédagogie*, Librairie Classique Delaplane, Paris, (31e édition).
300. PIAGET, J. & INHELDER, B. (1966) *La psychologie de l'enfant,* PUF, Paris.
301. PIAGET, J. (1967) *La psychologie de l'intelligence*, Armand Colin, Paris.
302. PIAGET, J. (1969) *Psychologie et pédagogie*, Gonthiers Denoël, coll. Médiations, Paris.
303. PIATELLI-PALMARINI, M. (1979) *Théories du langage, théories de l'apprentissage : le débat entre Jean Piaget et Noam Chomsky,* Seuil, Paris.
304. PICA, P. LEMER, C. IZARD, V. DEHAENE, S. (2004) Exact and approximate arithmetic in an Amazonian indigene group, *Science*, vol. CCCVI, n°5695, 15 octobre.
305. PINKER, S. (1994). *The Language Instinct,* Penguin Books, London.
306. PINKER, S. (2002) *The Blank Slate: The Modern Denial of Human Nature*, London: Penguin books.

307. PINTRICH, P.R. MARX, R.W. & BOYLE, R.A. (1993) Beyond cold conceptual change : The role of motivational beliefs and classroom contextual factors in the process of conceptual change, *Review of Educational Research*, 6, 167-199.

308. POLYA, G. (1954) *Mathematics and plausible reasoning. I. Induction and analogy in mathematics*, Princeton University Press, Princeton, NJ.

309. POPPER, K.R. (1935) *La logique de la découverte scientifique,* trad. 1973, réed. 1995, Bibliothèque Scientifique, Payot, Paris.

310. POSNER, G.J. STRIKE, K.A. HEWSON, P.W. & GERTZOG, W.A. (1982) Accommodation of a scientific conception : Toward a theory of conceptual change, *Science Education*, 66, 211–227.

311. PUCE, A. ALLISON, T. ASGARI, M. GORE, J.C. & MCCARTHY, G. (1996). Differential sensitivity of human visual cortex to faces, letterstrings, and textures : a functional magnetic resonance imaging study. *J. Neurosci.* 16, 5205–5215.

312. PYRAMID FILM & VIDEO (1988) *A private universe. An insightful lesson on how we learn*, Santa Monica, CA.

313. QUARTZ, S.R. & SEJNOWSKI, T.J. (1997) The neural basis of cognitive development : a constructivist manifesto, *Behav. Brain Sci.* 20, 537–556.

314. QUINO (1999) *Mafalda, l'intégrale*, Glénat, Paris.

315. QUIVY, R. & VAN CAMPENHOUDT, L. (1988) *Manuel de recherche en sciences sociales*, Dunod, Paris.

316. RAICHVARG, D. (1993) Science et spectacle, figures d'une rencontre, collection Giordan-Martinand, série Investigations scientifiques, Z'Editions, Nice.

317. RAMUS, F. (2008) Correspondance personnelle.

318. RASMUSSEN, J. (1983) Skills, Rules and Knowledge : signals, signs and symbols and other distinctions in human performance models, *IEEE trans. On Systems, Man and Cybernetics*, 13, 257-266.

319. RASMUSSEN, J. (1990). Mental models and the control of action in complex environments. In ACKERMANN, D. & TAUBER D. & M.J. (Eds.). *Mental Models and Human-Computer Interaction 1* . North-Holland : Elsevier Science Publishers, 41-46.

320. RAYNAL, F. & RIEUNIER, A. (1997) *Pédagogie, dictionnaire des concepts clés*, ESF, Paris.

321. REDDISH, E.F. (1993) The implications of cognitive studies for teaching physics, *American Journal of Physics,* 62(6), 796-803.

322. REZEAU, J (2001) *Médiatisation et médiation pédagogiques dans un environnement multimédia*, thèse, Université de Bordeaux 2.

323. ROGERS, C. (1951) *Client-Centered Therapy*, Houghton Mifflin, Harcourt.

324. ROGERS, C. (1969) *Freedom to Learn*, Dunod, Paris.

325. ROLLENHAGEN, J.E. & OLSON, C.R. (2000) Mirror-image confusion in single neurons of the macaque inferotemporal cortex, *Science* 287, 1506–1508.

326. ROUSSEAU, J-J. (1762) *Emile ou de l'éducation*, éd. Sociales, Paris.

327. RUEDA, M.R. ROTHBART, M.K. MCCANDLISS, B.D. SACCOMANNO, L. & POSNER, M.L. (2005) Training, maturation and genetic influences on the development of executive attention, *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 102, 14931–14936.

328. RUMELHART, D. & Mc LILLAND, J. (1986) *Parallel Distributed Processing : Exploration in the Microstructures of Cognition*, vol. 1 et 2, MIT Press, Cambridge.

329. SALOME, J. (2006) *Heureux qui communique*, Evolution, Pocket, Paris.

330. SALOMON, G. & GLOBERSON, T. (1987) Skill may not be enough : the role of mindfulness in learning and transfer, *International Journal of Educational Research*, 11, 623–637.

331. SCHAEFER, G. (1992) Zigzag learning, as a method of learning formation. In GIORDAN, A. GIRAULT, Y. *The new learning models*, Z'Editions, Nice.

332. SCHULTZ, D. IZARD, C.E. & BEAR, G. (2004) Children's emotion processing: relations to emotionality and aggression. *Dev. Psychopathol*. **16**, 371–387.

333. SCHURMANS, M.-N. & DOMINICE, L. (1998) *Le coup de foudre amoureux. Essai de sociologie compréhensive*, Réédition, PUF, Paris.

334. SCOTT, P. ASOKO, H. & DRIVER, R. (1992) Teaching for conceptual change: A review of strategies, *in* DUIT, R. GOLDBERG, F. & NIEDDERER, H. (Eds.), *Research in Physics Learning: Theoretical Issues and Empirical Studies*, Institute for Science Education at the University of Kiel, 310-329.

335. SCOTT, S. KNAPP, M. HENDERSON, J. & MAUGHAN, B. (2001) Financial cost of social exclusion: follow up study of antisocial children into adulthood. *Brit. Med. J.* **323**, 1–5.

336. SERRES, M. (1992) *Eclaircissements,* François-Bourin, Paris.

337. SINATRA, G.M. & PINTRICH, P.R. Eds (2003) *International conceptual change*, Erlbaum, Mahwah, NJ.

338. SKINNER, B.F. (1957) *Verbal Behavior,* Appleton-Century-Crofts, New York.

339. SKINNER, B.F. (1968) *The technology of teaching*, Appleton Century Crofts, New York.

340. SLAVIN, R. (1990) Research on Cooperative Learning: Consensus and Contreversy, *Educational Leadership,* 47, 4, 52-54.

341. SLOVIC, P. FINUCANE, M. PETERS, E. & MACGREGOR, D. G. (2002) The affect heuristic, *in* GILOVICH, T. GRIFFIN, D. & KAHNEMAN, D. (Eds.), *Heuristics and biases*, Cambridge University Press, 397–420.

342. SMITH, R. (1992) *Inhibition. History and meaning in the sciences of mind and brain*, Free Associations Books, London.

343. SMITH, A. (1996) *Accelerated Learning in the Classroom*, Network Educational Press Ltd, Bodmin.

344. SNYDERS, G. (1973) *Où vont les pédagogies non directives?* PUF, Paris

345. SOKAL, A. & BRICMONT, J. (1997). *Les impostures intellectuelles*, Odile Jacob, Paris.

346. SOLOMON, C. (1986) *Computer environments for children*, MIT Press, Cambridge.

347. SPELKE, E. KESTENBAUM, R. SIMONS, D.J. WEIN, D. (1995) Spatiotemporal continuity, smoothness of motion and object identity in infancy, *British Journal of Developmental Psychology*, **13**, 113-142.

348. SPERBER, D. & HIRSCHFELD, L. (1999) Evolution, Cognition and Culture, *MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences*, Robert Wilson & Frank Keil (eds), MIT Press, Cambridge.

349. SPERBER, D. & HIRSCHFELD, L. (2004) The cognitive foundations of cultural stability and diversity, *Trends in Cognitive Sciences*, 8 (1).

350. STANOVICH, K.E. & WEST, R.F. (2000) Individual differences in reasoning: Implications for the rationality debate, *Behavioral and Brain Sciences*, 23, 645–665.

351. STEELE, C.M. & ARONSON, J. (1995) Stereotype threat and the intellectual test performance of African Americans, *J Pers Soc Psychol* 69 (5): 797–811.

352. STEPANS, J. (2009) Targeting student's science misconceptions: Physical science concepts using the conceptual change model, Idea Factory, Riverview, FL.

353. STRIKE, K.A. & POSNER, G.J. (1992) A revisionist theory of conceptual change, in DUSCHL, R. & HAMILTON, R. (Eds.), *Philosophy of Science, Cognitive Psychology, and Educational Theory and Practice*, SUNY, Albany, NY, 147-176.

354. SUPPES, P. (1988) *The future of intelligent tutoring systems: problems and potential*, ITS-88 Proceedings, Montréal.

355. SWELLER, J. & CHANDLER, P. (1991) Evidence for Cognitive Load Theory, *Cognition and instruction*. 8(4), 351-362.

356. TALLAL, P. (2004) Improving language and literacy is a matter of time. *Nature Rev. Neurosci*. 5, 721–728.

357. THEODULE, M.-L. (2005) Olivier Houdé : "Se developer, c'est apprendre à inhiber", *La Recherche*, juillet-août 2005, 388, 74-77.

358. THIS, H. (2002) *Casseroles et éprouvettes*, Editions Pour la Science/Belin, Paris.

359. THIS, H. *in* PELLAUD, F. (2004) « Vive la chimie, en particulier, et la connaissance en général ! » - Entretien avec Hervé This, *Numéro Spécial Médiation de la chimie*, *L'actualité Chimique*, nov-déc. 2004.

360. THORNDIKE, E.L. (1911) *Animal Intelligence*, Macmillan, New York (reprinted 1999, Thoemmes, Bristol).

361. TICKTON, S. (1971) *To improve learning*, Bowker, New York.

362. TIPPER, S.P. (1935) The negative priming effect: inhibitory priming by ignored objects, *Quaterly Journal of Experimental Psychology*, 37, 571-590.

363. TOBELEM, J.M. (1992) De l'approche marketing dans les musées, *Publics & Musées*, no 2.

364. TOMASELLO, M. (2000) The Cultural Origins of Human Cognition, Harvard University Press, Cambridge.

365. TOULMIN, S. (1972) *Human Understanding: Vol. I*. Oxford University Press.

366. TRACES (groupe) (2011), sous la direction de EASTES, R.-E. & LELU, B. *Idées reçues sur la science*, Le Cavalier Bleu, Paris.

367. TVERSKY, A. & KAHNEMAN, D. (1974) Judgment Under Uncertainty: Heuristics and Biases, *Science*, New Series, vol. 185, No. 4157.

368. VAN PRAËT, M. (1989) Diversité des centres de culture scientifique et spécificité des musées, *Aster*, no 9.

369. VON GLASERFELD, E. (1989) Constructivism in education. In T. HUSEN & T.N. POSTLETHWAITE (Eds), *The international encyclopaedia of education*, Pergamon Press, New York, pp.162–163.

370. VOSNIADOU, S. & BREWER, W.F. (1994) Mental models of the day/night cycle. *Cognitive Science, 18*, 123-183.

371. VOSNIADOU, S. & BREWER, W.F. (1992) Mental models of the earth. A study of conceptual change in childhood. *Cognitive Psychology, 24*, 535-585.

372. VOSNIADOU, S. & IOANNIDES, C. (1998) From conceptual development to science education: A psychological point of view. *International Journal of Science Education, 20*, 1213-1230.

373. VOSNIADOU, S. (1994) Capturing and modeling the process of conceptual change, *Learning and Instruction*, 4, 45-69.

374. VYGOSTKY, L. (1930/1978) *Mind and Society: the Development of Higher Psychological Processes,* Harvard University Press, Cambridge.

375. VYGOSTKY, L. (1934/1985) *Pensée et Langage,* Éd. Sociales, Paris.

376. VYGOTSKY, L. (1933-1934) (1985) Le problème de l'enseignement et du développement à l'âge scolaire in *Vygotsky aujourd'hui*, sous la direction de SCHNEUWLY, B. et BRONCKART, J-P. Delachaux et Niestlé, Neuchâtel-Paris.

377. WAGER, W. APPLEFIELD, J. EARLE, R. DEMPSEY, J. (1990) *A Learner's Guide to Accompany Principles of Instructional Design,* HRW, New York.

378. WALLON, H. (1945) *De l'acte à la pensée, essai de psychologie comparée*, Flammarion, Paris.

379. WATSON, J.B. (1908) *The Behavior of Noddy and Sooty Terns*, Carnegie Institute Publication, 103, 197-255.

380. WATSON, J.B. (1914) *Behavior: An introduction to comparative psychology*, Henry Holt, New York.

381. WATSON, J.B. (1915) *Recent experiments with homing birds,* Harper's Magazine 131, 457-64.
382. WATSON, J.B. (1930) *Behaviorism* (revised edition), University of Chicago Press, 930.
383. WATSON, J.B. (1936) John Broadus Watson [Autobiography], *A History of Psychology in Autobiography*, C. Murchison (Ed.) Clark University Press, Vol. 3, 271-81.
384. WEINBERG, S. (1999) Une vision corrosive du progrès scientifique, *La Recherche*, 318.
385. WELLMAN, H.M. & GELMAN, S. (1992) Cognitive development: Foundational theories of core domains. *Annual Review of Psychology, 43*, 337–375.
386. WHITEN, A. GOODALL, J. MCGREW, W.C. NISHIDA, T. REYNOLDS, V. SUGIYAMA, Y. TUTIN, C.E. WRANGHAM, R.W. & BOESCH, C. (1999) Cultures in chimpanzees, *Nature* 399, 682–685.
387. WITTMANN M.C. (2002) The object coordination class applied to waves pulses: analysing student reasonning in wave physics, *International Journal of Science Education,* 24(1), 97-118.
388. WYNN, K. (1992) Addition and subtraction by human infants, *Nature*, 358, 749-750.
389. WYNN, K. (1998) Psychological foundations of number: numerical competence in human infants, *Trends in cognitive science*, 2, 296-303.
390. YANNI-PLANTEVIN, E. (1998) Transfert et affectivité, *Educations*, n° 15.

12. ANNEXES

12.1. Autres environnements didactiques

Comme annoncé dans la note du paragraphe *7.1.2.5. Avertissements*, quelques tentatives d'environnements didactiques ont été réalisées par des étudiants de l'Ecole normale supérieure lors d'enseignements dispensés en 2010. Ils sont reproduits ci-dessous.

12.1.1. Structure et organisation du savoir, processus cognitifs de traitement de l'information

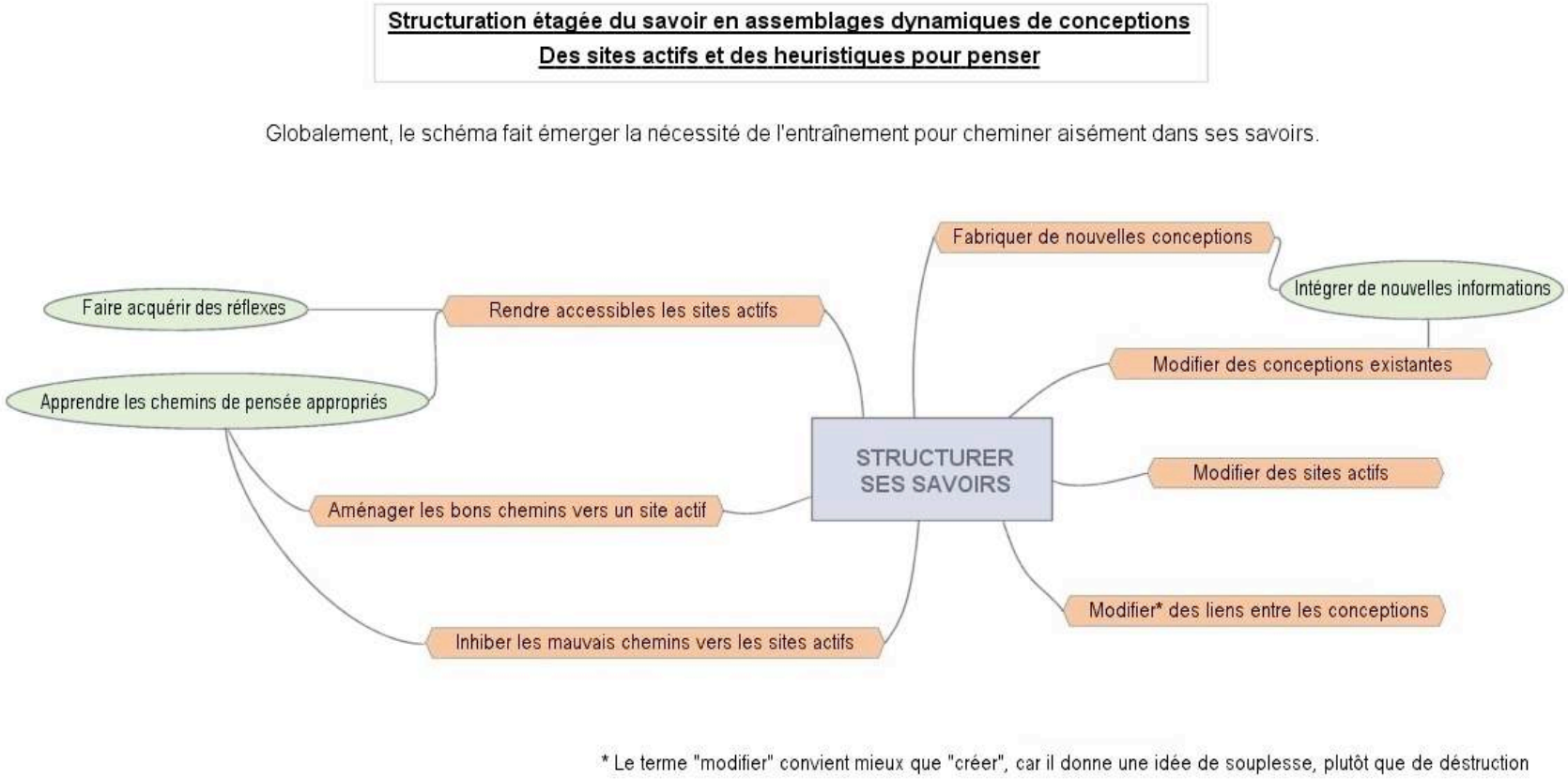


Figure annexe 1 : Premier exemple d'environnement didactique proposé par des étudiants.

12.1.2. Processus activés de transformation des conceptions

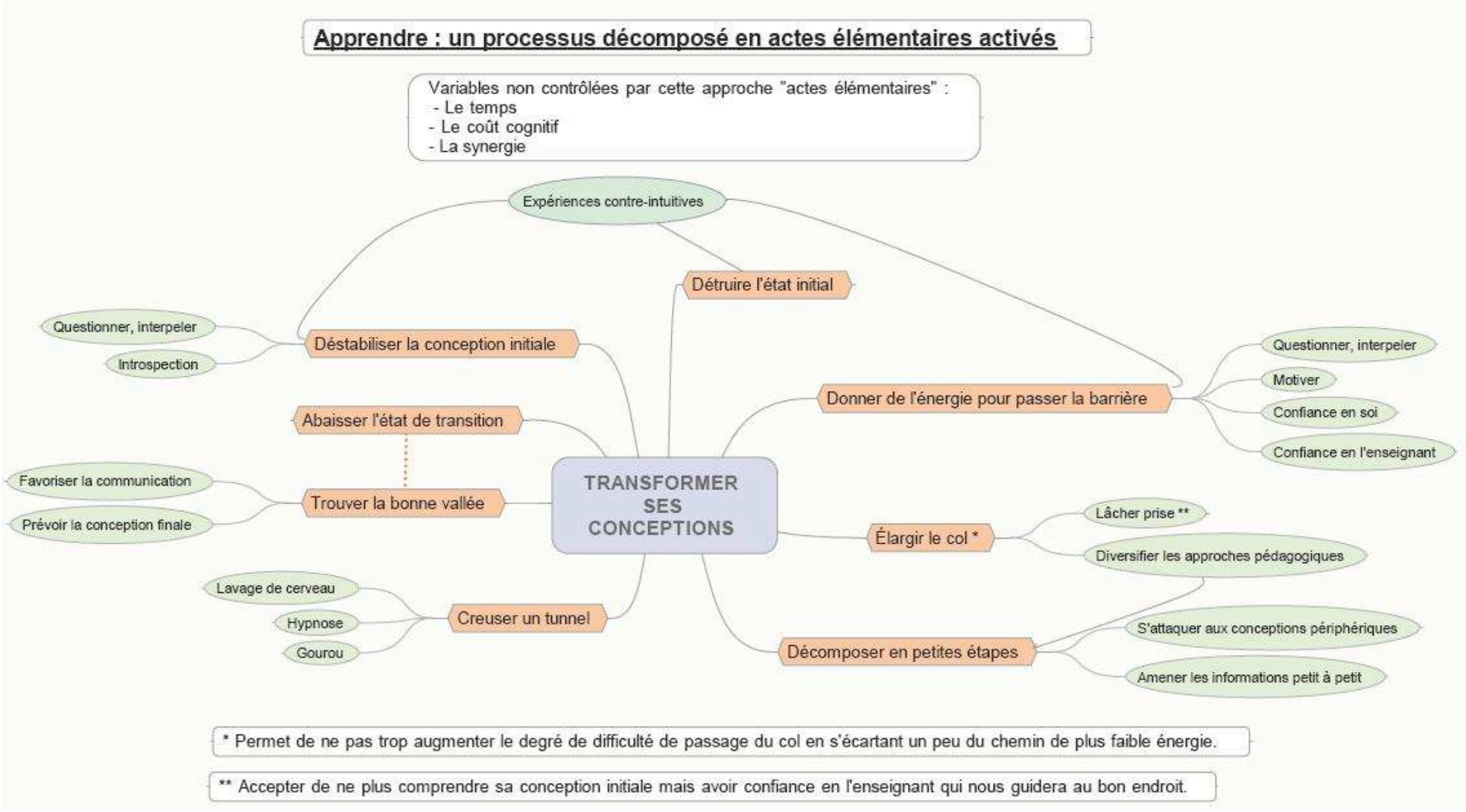


Figure annexe 2 : Deuxième exemple d'environnement didactique proposé par des étudiants.

12.1.3. Stabilité des structures de pensée

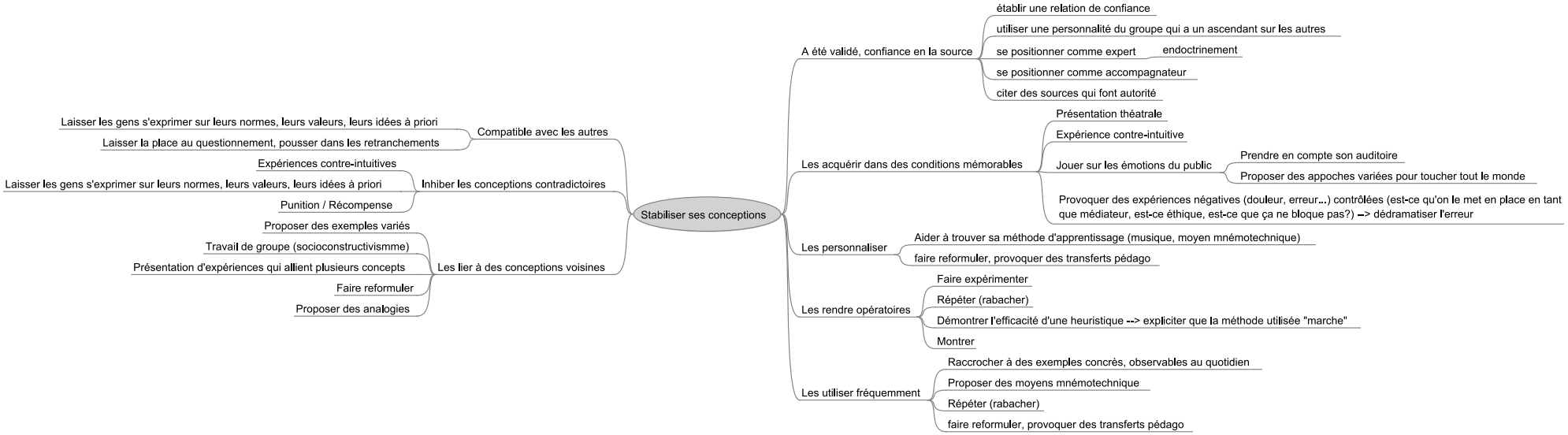


Figure annexe 3 : Troisième exemple d'environnement didactique proposé par des étudiants.

12.2. Résultats de la recherche expérimentale

Les tableaux suivants détaillent les entretiens menés dans le cadre des diverses séquences de recherche évoquées dans le texte. Les mentions *a* et *b* sont utilisées à chaque fois que deux personnes ont réalisé les expériences en même temps, sous la forme d'un binôme (soit parce qu'elles ne souhaitaient pas le faire seule, soit parce que l'une d'entre elles ne le pouvait pas (enfant trop jeune pour pouvoir lire, personne handicapée, etc.). F et G signifient respectivement « fille » et « garçon » ; l'âge est indiqué à côté de cette lettre dans la seconde colonne des tableaux.

12.2.1. Tableaux récapitulatifs des entretiens confirmant les prédictions sur l'expérience contre-intuitive

Chacun des tableaux qui suivent fait référence aux numéros des personnes interrogées dans le cadre des recherches préliminaires et d'approfondissement (pré-test uniquement). Ils signalent les entretiens qui permettent de valider les affirmations développées dans la section *8.2.2. Recherche préliminaire (2002)* auxquels s'ajoutent, entre parenthèses, les numéros des entretiens du pré-test de la *recherche d'approfondissement* (*8.2.3.*) qui, a posteriori, sont venus confirmer ces affirmations. Ces numéros, dont les plus significatifs sont soulignés, renvoient vers les retranscriptions de ces entretiens individuels, qui sont elles-mêmes rassemblées dans l'annexe *12.2.2. Tableaux récapitulatifs des entretiens*.

- Prédiction 1 : Performance de l'outil

Chaud ou froid ?	1-5, 2-6, 3, 4, 7-9, 10a, 10b, 12b, 13a-14a
La course des balles	25-27-28-26, 29, (31-35a-35b, 33b, 34a, 30-32-33a-34b-36a-36b-37a-37b-38a-39a)
Le ludion	(48, 49-52a-54a, 51)
Les feuilles amoureuses	70

Tableau annexe 1a

Chaud ou froid ?	1, 2, 3, 5, 6, 12a, 13a, 14a
La course des balles	29, 36a, (39b)
Le ludion	46, 47, 48, (49, 51, 52a, 52b, 54a)
Les feuilles amoureuses	67, 68, 69, 70

Tableau annexe 1b

Chaud ou froid ?	17, 21a, 24
La course des balles	40, 43, (44a-44b-44c)
Le ludion	57, 58, 60, (62a, 62b, 62c, 63a-63b, 64a, 65a)
Les feuilles amoureuses	81, 82, (85b, 86a, 87b)

Tableau annexe 1c

Le ludion	48, (62a, 64a)
Les feuilles amoureuses	79, (74, 76a, 76b, 83a)

Tableau annexe 1d

- Prédiction 2 : cadre de référence

Chaud ou froid ?	6
Le ludion	(65)
Les feuilles amoureuses	(75b)

Tableau annexe 2a

La course des balles	(36b)
Le ludion	47-48-(52b-54-62c-64a, 64a-64b)
Les feuilles amoureuses	(75a)

Tableau annexe 2b

Le ludion	46, (50)
Les feuilles amoureuses	(73)

Tableau annexe 2c

- Prédiction 3 : contre-intuitivité

Le ludion	46, 55b, (50, 55a, 64b)
Les feuilles amoureuses	79, 81, (72, 73, 74, 76a, 76b, 83a, 84a, 85a, 85b, 86a, 87b)

Tableau annexe 3

- Prédiction 4 : contexte et mise en scène

Néant

- Prédiction 5 : questionnement préalable

Chaud ou froid ?	15, 16, 18, 19a, 21b, 23
La course des balles	41, 42, (45a, 45b)
Le ludion	(62a, 63a)
Les feuilles amoureuses	79, 81, 82, (73, 74, 76a, 76b, 83a, 84a, 85a, 85b, 86a, 87a, 87b)

Tableau annexe 5a

Chaud ou froid ?	17, 19b, 20a, 20b, 20c, 21a, 24
La course des balles	40, 43
Le ludion	Ludion en général
Les feuilles amoureuses	78, 80, (83b)

Tableau annexe 5b

- Prédiction 6 : limites de la contre-intuitivité

La course des balles	26, (33b, 37a, 38b)
Les feuilles amoureuses	(72, 74, 75b, 76b, 77a, 77b)

Tableau annexe 6a

Le ludion	46, 59, (50, 51, 52a, 52b, 54a, 54b, 61a, 61b, 64a, 64b, 65a, 65b, 66a, 66b)
Les feuilles amoureuses	(73)

Tableau annexe 6b

La course des balles	42, 43, (35a, 35b)
Le ludion	58, (62c)
Les feuilles amoureuses	Sèche cheveux aspire

Tableau annexe 6c

Chaud ou froid ?	5

La course des balles	(37b)
Le ludion	60
Les feuilles amoureuses	81, (84b)

Tableau annexe 6d

Chaud ou froid ?	3, 6, 14a
La course des balles	(30, 34a, 34b, 38b, 39b)

Tableau annexe 6e

Chaud ou froid ?	7, 12a
La course des balles	(30, 31)
Les feuilles amoureuses	(76a)

Tableau annexe 6f

Chaud ou froid ?	7a, 21a
La course des balles	25, 30, 31, 32, 40, (33)
Le ludion	46, (50, 54b, 63a, 66b)
Les feuilles amoureuses	Feuilles amoureuses en général

Tableau annexe 6g

Chaud ou froid ?	4, 12b, 19b, 20a, 20b, 20c, 21a, 21b
La course des balles	25, 27, 28, 29, 40, (32, 33a, 33b, 38a, 39a)
Le ludion	46, 47, 48, 57, 58, (50, 54a, 54b, 61a, 61b, 62a, 63a, 64a, 64b, 65a, 65b, 66a, 66b)
Les feuilles amoureuses	Feuilles amoureuses en général

Tableau annexe 6h

Chaud ou froid ?	13a, 13b, 14b
La course des balles	(36a)
Le ludion	56, (53, 56, 62b)

Tableau annexe 6i

- Prédiction 7 : risques et effets néfastes

Chaud ou froid ?	1, 2, 3, 5, 17, 24
La course des balles	26, 29, (35b, 39b)
Le ludion	46, 47, 48, 60, (49, 51, 52a, 52b, 62a, 63a, 63b, 64a, 64b, 65a)
Les feuilles amoureuses	69, 70, 81, (79, 85a, 85b, 86a, 87b)

Tableau annexe 7a

La course des balles	29, 43
Les feuilles amoureuses	Le sèche cheveux qui « aspire »

Tableau annexe 7b

Chaud ou froid ?	14a
La course des balles	(36b)
Le ludion	(54a, 62c, 64a, 64b)
Les feuilles amoureuses	Feuilles amoureuses en général

Tableau annexe 7c

- Prédiction 8 : accompagnement

Le ludion	57, 59, (49a, 51, 52a, 52b, 54a)
Les feuilles amoureuses	Accompagnement insuffisant car phénomènes hors ZPD

Tableau annexe 8a

Le ludion	46, 59, 61a, (50, 51, 52a, 52b, 54a, 54b, 61b, 64a, 64b, 65a, 65b, 66a, 66b)
Les feuilles amoureuses	67, 68, 69, (87a)

Tableau annexe 8b

- Résultats complémentaires

	Adultes	*Enfants*
Chaud ou froid ?	3, 4, 6	5, 10a
La course des balles	26, 27, 29	
Le ludion	47, 48	(52b, 54b, 62)
Les feuilles amoureuses	67, 68, 70, 81	69, (84b, 85b, 87b)

Tableau annexe 9a

Chaud ou froid ?	3, 6
La course des balles	27, 29
Le ludion	48
Les feuilles amoureuses	70

Tableau annexe 9b

Le ludion	55

Tableau annexe 9c

Le ludion	Ludion en général
Les feuilles amoureuses	Feuilles amoureuses en général

Tableau annexe 9d

12.2.2. Tableaux récapitulatifs des entretiens

12.2.2.1. Recherche préliminaire (2002)

- Chaud ou froid ?

ENTRETIENS DE TYPE 1

Fête de la Science, Paris, oct. 2002				
No	**Sexe-Age**	**Réponse avant expérience et argument**	**Réponse après expérience et arguments**	**Analyse**
*1	1G- 14	- aluminium - l'alu est utilisé pour réchauffer les blessés en cas d'accident *Q du chercheur : si c'était autre objet : temp. = ?*	- même temp. - laine est faite avec de l'alu *réponse non*	**Adaptation** de l'info à la conception initiale *non apprentissage*
*2	2G -7	-laine - parce que chaude *QC : Qu'est-ce que tu entends par ça attire le soleil?*	- La laine ça tient chaud et l'aluminium ça tient froid mais ça attire le soleil *Ça se réchauffe*	**Adaptation** par liens avec d'autres conceptions *non apprentissage*
*3	1F-32	- aluminium - L'aluminium prend d'avantage le chaud, mais en même temps c'est un isolant avec le froid peut-être pas avec le chaud, *QC : la température va suivre la température ambiante ?* *QC2 : c'est un peu la même matière?* *QC3 : Et si on prenait d'autres matières?*	La question est de savoir si en cas de gel, la chaussette de laine va afficher -10°C et la aussi *Parce que entre la laine et l'aluminium, il y a une différence génétique relativement faible (réponse pas vraiment sérieuse). Pas des gènes mais des molécules on va dire qui réagissent à peu près de la même façon* *Oui* *Non, si on prend du bois, par exemple, il va pas devenir vraiment froid.*	**Rejet** : résultat pris comme un cas particulier *Explication trouvée en fonction d'autres conceptions relatives à la similitude des matériaux* *non apprentissage*
*4	2F-60	- aluminium la chaleur de la main se met dessus puis se reflète ensuite. Alors ça chauffe plus vite. Et ça (la laine) puisque c'est un produit naturel, ça fait un échange entre les deux. C'est pourquoi la laine est tellement connue pour tenir le chaud. Là ça retient le chaud et là ça se reflète.	pas de réponse	**Rejet** de l'information : pas d'apprentissage
*5	3G-12	- aluminium l'alu est utilisé par les pompiers pour réchauffer les blessés en cas d'accident QC : si on les déplie elles seront à la même température?	Parce qu'elle est pliée il y a plus de chaleur et celle-là aussi elle est mise en boule, la chaleur elle est à l'intérieur. l'aluminium parce que si y a du vent qui passe dessus, là y a des trous (en parlant de la laine) là y en a pas.	Chaleur « autonome » : **Adaptation** par liens avec d'autres conceptions (forme). Solution adaptée à la conception

*6 a	3F-35	sonde du thermomètre émet un courant électrique		
b	4G-35	alu : plus condensé = conserve plus chaleur surtout métal. Chaussette isole intérieur/extérieur donc chaude à l'intérieur mais pas à l'extérieur	D'accord pour admettre qu'ils sont influencés par le même environnement… mais « faudrait creuser un trou et tout de suite aller mesurer la température, parce que même la sonde qui est à l'air est influencée par le milieu environnant. »	**Rejet** de l'info, persistance de la conception liée à l'intérieur et à l'extérieur. Pas d'apprentissage

Tableau annexe 11a

ENTRETIENS DE TYPE 2

Fête de la Science, Paris, oct. 2002			
No	**Sexe-Age**	**Réponse après expérience et arguments**	**Analyse**
*15	11F-16	normal : réf. à la température ambiante	**Ancrage** d'une conception correcte : pas d'apprentissage
*16	12F-40	normal : réf. au pouvoir isolant spécifique aux deux matériaux et à la température ambiante	**Ancrage** d'une conception correcte : pas d'apprentissage
*17	12G-14	étonné parce que laine plus chaude. Explication : l'alu « prend » le soleil QC : l'aluminium il prendrait la température du soleil et pas la laine ? Je ne sais pas	**Adaptation**, voire **rejet** de l'info, l'explication reste liée au cas de l'expérience
*18	10F-10	températures identiques : aucun étonnement	**Pas de contre-intuitivité**. Pour 3 d'entre eux, c'est normal puisque le résultat ne les surprend pas. Pour les autres, ils en restent à une incompréhension basée sur leur conception de départ donnant la laine comme « plus chaude ».

Tableau annexe 11b

Cette expérience a fait l'objet d'un pré-test dans les classes enfantines de Bienne, en février-mars 2003, mais pas de post-test. Nous reproduisons donc ici les données correspondantes, en guise de complément aux entretiens menés dans la recherche préliminaire.

ENTRETIENS DE TYPE 1

Classe primaire, Bienne, 26 février 2003				
No	**Sexe-Age**	**Réponse avant expérience et argument**	**Réponse après expérience et arguments**	**Analyse**
*7	4F-9 1/2	- laine exemple des pulls utilisés en hiver	étonnée, mais pas d'explication réelle. Pense que l'aluminium est quand même moins chaud	**Rejet** de l'info : pas d'apprentissage
*8	5F-9 1/2	-	pas d'expérimentation : défaut du matériel	
*9	5G-10	- la laine, elle chauffe	pas d'expérimentation : défaut du matériel	

*10	a	6G-12	- laine, électricité statique	pas d'expérimentation : défaut du matériel	
	b	6F-9	- laine, alu plus mince, plus léger	pas d'expérimentation : défaut du matériel	
*11	a	7F-8 1/2	-	pas d'enregistrement	
	b	7G-10	-		

Classe spéciale, Bienne, mars 2003				
No	**Sexe-Age**	**Réponse avant expérience et argument**	**Réponse après expérience et arguments**	**Analyse**
*12 a	8G-12	- un des deux (sans préciser)	tente de comparer en changeant les paramètres : mettre les deux dans le frigo finalement pense quand même que la laine chauffe plus	**Rejet** de l'info : reste sur conception initiale d'un pouvoir calorifère à la laine : pas d'apprentissage
b	9G-10	- la laine, ça chauffe vite	étonné parce que la laine, normalement, elle réchauffe plus	Rejet de l'info : reste sur conception initiale
*13 a	8F-10	- la laine, quelque chose qui prend beaucoup de chaud	comprend que tous deux prennent la chaleur du soleil, donc normal qu'il y ait même température	**Transformation** de la conception initiale, mais part déjà avec une idée de prendre la chaleur et non pas donner
b	10G-10	- la laine	si pull en alu, on aurait froid. D'accord pour dire que ni laine ni alu donnent la chaleur	**Transformation** de la conception initiale par socioconstructivisme
	10G=11	- la laine	parce qu'elle retient le chaud	**Retour à la conception initiale**
*14 a	11G-10	- laine, parce que laine prend chaleur du soleil	doute du résultat : argumente sur la manière de manipuler le thermomètre. Argumente en utilisant la grandeur des objets : grande couverture chaufferait plus	**Rejet** de l'info : persistance de la conception initiale : pas d'apprentissage
b	9F-10	- laine, sensation de froid quand on touche alu	Accepte la mesure sans étonnement : trouve d'autres situations, au froid, au chaud. Parle de la conservation de la chaleur par la laine	**Ancrage** d'une conception « juste » par liens avec d'autres conceptions : différenciation entre sensation et conservation de chaleur .

Tableau annexe 11c

ENTRETIENS DE TYPE 2

Classe primaire, Bienne 26 février 2003			
No	**Sexe-Age**	**Réponse après expérience et arguments**	**Analyse**
*19 a	13G=9	pas d'étonnement	**Pas de contre-intuitivité**.
b	11F=91/2	étonnée, laine devrait être plus chaude	**Mémorisation** d'une info perturbatrice
*20 a	14G=10	étonné, laine devrait être plus chaude	**Mémorisation** d'une info perturbatrice
b	12F=9	étonné, laine devrait être plus chaude	**Mémorisation** d'une info perturbatrice
c	13F=9	étonné, laine devrait être plus chaude	**Mémorisation** d'une info perturbatrice
	13F=10	se souvient que c'était la même température	**Mémorisation, mais sans transformation de conception**

Classe spéciale, Bienne, mars 2003			
No	**Sexe-Age**	**Réponse après expérience et arguments**	**Analyse**
*21 a	15G=10	étonné, la laine devrait marquer plus, elle est déjà chaude (par nature). Pas d'explication possible	**Mémorisation** d'une info perturbatrice
b	14F=13	pas étonnée, dit pourtant que la laine devrait être plus chaude. Pas d'explication possible	**Pas de contre-intuitivité**., voire **rejet** de l'info
*23 a	16G-10	températures identiques : aucun étonnement	**Pas de contre-intuitivité**.
b	15F-12	étonnée, pensait que laine chauffait plus. Explication donnée par l'alu qui « retient » plus la température. QC : et la laine ? Réponse : également, donc même température QC2 : Alors les deux ils ont la température ambiante ? Réponse : oui	**Transformation** de la conception initiale par confrontation au résultat et par déductions induites par le chercheur.

Tableau annexe 11d

- La course des balles

ENTRETIENS DE TYPE 1

Fête de la Science, Paris, oct. 2002				
No	**Sexe-Age**	**Réponse avant expérience et argument**	**Réponse après expérience et arguments**	**Analyse**
*25	17G-7	**Pétanque**, plus lourde (envisage 50cm de différence avec tennis)	aucune explication, mais ajoute qu'il pensait qu'elle tomberait plus vite	**Mémorisation** d'info, voire **rejet**
*26	16F-40	**Pétanque** (intuitivement) mais parle de réminiscence de frottement qui devraient donner un résultat inverse ou provoquer la chute simultanée (20 cm de différence)	pas vraiment étonnée puisque s'attendait à ce que ça ne soit pas si facile. Revient sur explication par frottement.	**Ancrage** de la conception initiale : frottement qui provoque chute simultanée
*27	17F-32	**Pétanque**, plus lourde, plus entraînée par poids, donc plus vite. Explique la différence de vitesse par proportionnalité au poids (10x moins lourde donc 10x moins vite).	étonnée car persuadée de sa conception. Explique par sa « mémoire sélective de l'école »	**Perturbation** qui conduit à un **Mémorisation** de l'info, sans système explicatif. Ordre de grandeur non maîtrisé provoque résultat envisagé aberrant,.
*28	18G-12	Pétanque, plus lourde, plus soumise à « l'attirance de la terre ». (différence 20 cm).	accepte le résultat, tout en affirmant qu'il voit la boule de pétanque arriver la première à cause de son aspect métallique qui attire son œil.	perturbation, bonne analyse des aberrations de ses sens. Pas de transformation de conception notoire
*29 a	3F-35	**Tennis**, ne sait pas pourquoi	« ton truc il marche pas »	**Perturbation** qui conduit à un **Mémorisation** de l'info
b	4G-35	**Tennis**, P=mg « plus le poids est important, plus l'accélération se fera moins rapidement, donc la balle de tennis arrivera normalement avant la boule de pétanque »… « Sur une petite distance la balle de	« J'aurais tendance à dire qu'en fin de compte c'est une question de positionnement par rapport à l'espace, de hauteur de la chute, peut-être que la hauteur est plus significative que l'attraction terrestre… j'ai plus de théorie, là. »	Part avec une conception correcte et l'abandonne suite à l'expérience. **Transformation négative** de la conception initiale en lien avec d'autres conceptions (hauteur plus significative qu'attraction terrestre…)

		tennis aurait tendance à se poser plus rapidement alors que sur grande distance, l'accélération aidant, le poids le plus lourd va prendre de plus en plus de vitesse et donc descendre de plus en plus rapidement. »		

Tableau annexe 12a

ENTRETIENS DE TYPE 2

Fête de la Science, Paris, oct. 2002			
No	**Sexe-Age**	**Réponse après expérience et arguments**	**Analyse**
*40	18F-15	étonnée, parce que tennis devrait aller plus vite	L'expérience reste contre-intuitive, **Mémorisation** de l'info perturbatrice
*41	19F-17	pas étonnée : question d'altitude identique, donc pas de raison qu'elles n'arrivent pas en même temps	**Pas de contre-intuitivité**
*42	20F-17	voit la balle de pétanque : confirme ce qu'elle pensait	**Pas de contre-intuitivité** et **rejet** de l'info pour confirmer sa conception initiale
*43	21F-60	observe la balle de tennis arriver en premier, étonnée car pensait le contraire. C. fait l'exp. pour elle, observe arrivée identique, explique : « L'attirance de la Terre reste la même pour n'importe quel poids. C'est ça ? »	**Transformation** vers une nouvelle conception

Tableau annexe 12b

- <u>Le ludion</u>

ENTRETIENS DE TYPE 1

Fête de la Science, Paris, oct. 2002				
No	**Sexe-Age**	**Réponse avant expérience et argument**	**Réponse après expérience et arguments**	**Analyse**
*46	26F-17	Pas d'anticipation, pas de résultat	tente d'utiliser l'idée de pression, mais à l'envers. Aboutit à « je ne sais pas »	**Mémorisation** de l'info, avec appel à une conception erronée pour tenter d'expliquer.
*47	27F-32	Anticipation par déduction : il faudrait « Un poids plus lourd ou enlever l'eau », Résultat par hasard	« On exerce une pression, on expulse l'air… je sais pas, je dis ce qui me passe par la tête. La pression fait que ça descend, ça fait remonter des bulles d'air… j'en sais rien. Je sais pas, ça condense, il y a une masse qui est plus forte autour de l'objet et donc ça fait descendre, comme si en fait, l'eau était une sorte de gélatine et ça le comprime et ça le pousse vers le bas. » Aboutit à « je ne sais pas »	**Mémorisation** de l'info, avec énumération d'un ensemble de notions se rapportant aux liquides, mais sans réflexion.

*48 a	4G-35	« On va secouer et ça va créer une onde qui va… en fait l'objet à l'intérieur a toujours une masse donc il aura une certaine inertie, donc il va se déplacer dans le liquide pis comme il y toujours une poche d'air a priori dans le stylo, donc forcément ça va flotter. »	« C'est une question de masse par rapport à l'air. » « C'est en fin de compte l'onde de pression, l'eau va se mélanger à l'air, créer des microbulles telles que l'on voit là (il montre la bouteille) donc il y a plus de pression au sein de la bouteille lorsqu'on relâche cette pression-là, l'air a tendance à remonter. »	**Ancrage** de la conception initiale faisant référence à l'onde par **appel à une autre conception.**
b	3F-35	pas d'anticipation, expérience réussie par hasard	« c'est la pression, non ? C'est la pression du doigt sur la bouteille, quand on appuie l'eau remonte donc y a moins d'air en haut et le truc redescend. C'est pas ça ? Je sais pas ! J'étais nulle à l'école (rires) »	Observation correcte de la « diminution de la poche d'air » (mise en évidence par son partenaire). **Mémorisation?** **Transformation de la conception initiale ?**

Tableau annexe 13a

ENTRETIENS DE TYPE 2

Fête de la Science, Paris, oct. 2002			
No	**Sexe-Age**	**Réponse après expérience et arguments**	**Analyse**
*55	19G-7	« truc » donné par maman, explication de lui : « Parce que ça enlève de l'air, ça se remplace par de l'eau pis ça devient plus lourd. » (expérience déjà vue, mais oubliée)	**Création d'une conception** par l'observation et la réminiscence d'une info stockée. Explication du « pourquoi » mais pas du « comment »
*56	20G-17	« truc » trouvé : « Y a de l'eau qui monte dans le stylo et ça le fait descendre. Parce qu'il est trop lourd »	**L'observation spontanée** conduit à l'explication du « pourquoi » mais pas du « comment »
*57	21G-14	« truc » trouvé : explication référence à pression, mais impossible à expliciter Après observation : - Y a l'air qui s'en va. - C'est fermé pourtant. L'air peut pas s'en aller. - L'eau force sur l'air. - Et alors, ça fait quoi ? - Je sais pas.	**Création d'une conception** par l'observation et **appel à d'autres conceptions pour confirmer cette nouvelle conception**
*58	22G-14	« truc » trouvé : « Y pas d'air (dans la bouteille), si il y avait de l'air, ça serait pas descendu. » Ne peut pas expliquer pourquoi.	**Création d'une conception erronée** basée sur la déduction et non sur l'observation.
*59	22F-14	pas trouvé le « truc ». Après démonstration : « Quand on appuie, le niveau d'eau monte dans le style et donc il devient plus lourd. »	**L'observation dirigée** conduit à l'explication du « pourquoi » mais pas du « comment ».
*60	23F-30	« truc » trouvé en pressant le haut de la bouteille : « La pression de l'eau est plus importante dans le haut de la bouteille, l'objet va vers la partie basse » Elle fait l'expérience en pressant le bas de la bouteille : « l'eau fuit vers le haut et ça se concentre là (vers le haut) »	Sa première expérience lui donne une explication qui lui semble satisfaisante. La contre-expérience est alors **détournée** pour que l'explication conforte cette conception initiale.

Tableau annexe 13b

- Les feuilles amoureuses

ENTRETIENS DE TYPE 1

Fête de la Science, Paris, oct. 2002				
No	**Sexe-Age**	**Réponse avant expérience et argument**	**Réponse après expérience et arguments**	**Analyse**
*67	28F=45	en poussant le carton au bord de la table et en le soulevant	que l'air soit chaud a une influence l'air tourbillonne et pousse le carton vers le sèche-cheveux	**transformation** de la conception, **appel à autres conception**s sur l'air (chaud, tourbillon)
*68	29F=32	le souffler et le maintenir, sans grande conviction utilise l'aspiration de l'arrière du sèche-cheveux	étonnée car pensait que expulserait l'air est « apprivoisé », « condensé » par le « va et vient », crée une force… mais pas convaincue par ses explications	**Mémorisation**, après appel à autres conceptions liées à l'air
*69	30F=13	le souffler et le maintenir réussi par hasard	explication relative à la similitude des matériaux (cartons), à l'air (sans explication), aux trombones Après avoir vu que sans courant les trombones ne servent à rien, aucune explication	s'accroche aux **éléments perturbateurs** et fait appel à des conceptions erronées (similitudes des matériaux).
*70	4G=35	électricité statique : « décomposition atomique faite par des électrons et des neutrons » QC quand 3F trouve une solution sans enclencher le sèche-cheveux : et si on allume le sèche-cheveux « il va s'envoler »	« le souffle n'est pas partout le même à un moment donné, ce qui fait qu'il y un frottement d'un côté, il y a un frottement de l'autre côté (…) comme l'air qui devrait sortir tourne, c'est celui-là qui frotte et ainsi de suite »	**transformation** de la conception, **appel à d'autres conception**s sur l'air
	3F=35	le souffler et le maintenir Trouve un moyen sans enclencher le sèche-cheveux QC quand 3F trouve une solution sans enclencher le sèche-cheveux : et si on allume le sèche-cheveux « ça dépend de la force du sèche-cheveux »	« les trombones sont aimantés » C. essaye avec puis sans souffle. Aucune explication.	s'accroche aux **éléments perturbateurs** en cherchant une explication ne faisant pas appel aux particularités de l'expérience
*71	26G=13	le souffler et le maintenir, sans grande conviction réussi par essai	« Y a l'air qui sort d'entre les deux rondelles de papier. Mais je sais vraiment pas pourquoi ça tient » Il précise que sans le disque de carton, ça ne marche pas.	**Mémorisation** de l'info

Tableau annexe 14a

ENTRETIENS DE TYPE 2

Fête de la Science, Paris, oct. 2002			
No	**Sexe-Age**	**Réponse après expérience et arguments**	**Analyse**
*78	23G=7	étonné, car pensait qu'il devrait le maintenir en l'air. Et : « je croyais que ça allait s'envoler avec la force »	**Mémorisation** de l'info
*79	24G=12	pas étonné puisque le sèche-cheveux aspire. En refaisant l'expérience, il constate son erreur. « En fait, ça m'étonne quand même un peu. Je pensais que ça aspirait, j'avais pas réfléchi. »	**Pas de contre-intuitivité**, conforte sa conception initiale du sèche-cheveux qui « aspire »,puis s'accroche aux éléments perturbateurs pour conforter sa position de départ.

		Son explication se porte alors sur les trombones qui doivent avoir une fonction, mais sans autres explications.	
*80	25G=14	Réussi du premier coup : « Ben un peu (étonné), parce qu'on souffle sur le carton pis au lieu de partir il aspire » Pas d'explication.	**Pas vraiment de contre-intuitivité**, la solution étant presque induite par l'expérience, malgré une réflexion correcte au départ.
*81	24F =50	Réussi du premier coup : Pas étonnée « Non, c'est un phénomène de chaleur, c'est l'électricité statique, je ne sais pas » « l'électricité statique peut-être parce quand on se lave les cheveux (…) ils brûlent parce que j'avais mis trop près, c'est la chaleur qui attire (…). Franchement comme je suis pas du tout scientifique je fais pas la différence… pour moi l'électricité statique c'est toujours un peu de la chaleur. »	**Pas de contre-intuitivité**, mais pour d'autres raisons que l'aspiration du sèche-cheveux (électricité statique, chaleur qui « attire », confusion entre électricité statique et chaleur).
*82	25F =25	- Réussi du premier coup. « avec la puissance de l'air, il reste collé au séchoir (…). C'est par rapport aux trombones.(…) ça laisse un champ d'air, ça laisse une distance entre les deux cartons, mais je sais pas »	**Pas de contre-intuitivité**, explications allant à l'encontre de la logique(puissance de l'air qui maintient « collé ») et faisant appel aux éléments perturbateurs (trombones) pour aider ce phénomène.

Tableau annexe 14b

12.2.2.2. Recherche d'approfondissement : pré-test (2003)

Dans les tableaux suivants, la première colonne indique la référence de chaque personne interrogée ; la seconde son sexe et son âge.

- 12.2.2.1. La course des balles

ENTRETIENS DE TYPE 1

Classe primaire, Bienne, 26 février 2003				
No	**Sexe-Age**	**Réponse avant expérience et argument**	**Réponse après expérience et arguments**	**Analyse**
*30	4F-9 1/2	**Pétanque**, plus lourde, donc plus vite	étonnée	**Ne peut pas expliquer**
*31	5F-9 1/2	**Tennis**, plus légère	étonnée, reste sur son idée qu'elle aurait du aller plus vite	**Rejet** de l'info
*32	5G-10	**Pétanque**, plus lourde	étonné, mais pas d'explication	**Rejet** de l'info
*33 a	6F=9	**Pétanque**, plus lourde	admet que son camarade a raison, mais est étonnée du résultat	**Rejet** de l'info
b	6G=12	en même temps, poids n'a rien à voir a déjà vu l'exp. à la TV	pas étonné	**Ancrage** d'une conception correcte
*34 a	7F=8 1/2	**Tennis** parce que plus légère Après explication de son camarade : **pétanque** parce que plus lourde	malgré plusieurs essais, les enfants n'arrivent pas à « voir » que les deux balles arrivent en même temps au sol, malgré l'intervention d'autres enfants « témoins ».	**Rejet** de l'info, change en fonction des arguments et de sa perception du résultat
b	7G=10	**Pétanque**, plus attirée à cause de son poids (différence 10 cm)		**Rejet** de l'info, reste sur idée que l'une des deux va plus vite.

Classe spéciale, Bienne, mars 2003				
No	**Sexe-Age**	**Réponse avant expérience et argument**	**Réponse après expérience et arguments**	**Analyse**
*35 a	8G=12	**Tennis**, plus légère	voit la pétanque arriver en premier	**Rejet** de l'info, mais pas en adéquation à sa conception initiale
b	9G=10	**Tennis**, parce que pétanque va pas vite	voit la pétanque arriver en premier, explique que c'est à cause de son poids. Etonné que ça ne soit pas la plus légère	**Transformation** de sa conception initiale et **création** d'une nouvelle conception erronée.
*36 a	8G=10	**Pétanque**, plus lourde donc plus attirée	« moi j'ai compris maintenant. Cette boule elle va vite parce qu'il est lourd et celle-là elle va vite parce qu'il est léger. C'est tout la même chose parce que celle-là elle est légère et que des fois les légères elles peuvent aller plus vite. »	**Transformation** de sa conception initiale vers une conception plus « juste », même si ses explications restent confuses.
b	10F=10	**Pétanque**, plus lourde (différence 5cm)	Observe et compare les rebonds des deux balles, sans pouvoir observer l'arrivée des balles.	Expérience **inadaptée au cadre de référence**. Ne s'intéresse plus à la question initiale
*37 a	11G=10	**Pétanque**, plus lourde (différence 2 cm)	Accepte le résultat, mais sans explication	**Pas de contre-intuitivité**
b	9F=10	**Pétanque**, plus lourde (différence 5cm)	Voit la pétanque arriver plus vite	**Rejet** de l'info
*38 a	15G=10	**Pétanque**, plus lourde donc plus vite (différence 20 cm)	accepte le résultat, sans explication	**Mémorisation** de l'info
b	14F=13	**Même temps**, pas d'explication	met en doute le résultat, pas d'explication	**Pas de contre-intuitivité**
*39 a	13G=9	**Pétanque**, plus lourde	ensemble	**Mémorisation** de l'info
b	11F=9 1/2	**Pétanque**, plus lourde	admet qu'elles tombent ensemble et explique que la tennis étant plus légère, elle peut tomber plus vite	**Transformation** de la conception initiale avec explication allant vers une conception « juste »
*45 a	8F=10	**Pétanque**	Constate la simultanéité mais reste accrochée par le fait que la balle de tennis rebondit	**Perturbée, mais pas par le résultat.**
b	10G=10	**Pétanque**, parce qu'elle est dure, elle est attirée et va plus vite. Confusion entre dure et lourde. Prend exemple sur les fusées qui sont lourdes.	constate l'arrivée simultanée mais se laisse perturber par la réflexion de 8F sur le rebondissement. Néanmoins, explique que les deux arrivent en même temps parce que l'une est plus lourde et l'autre plus légère et que parfois, « les plus légères peuvent aller plus vite ».	**Transformation de la conception initiale**

ENTRETIENS DE TYPE 2

Classe primaire, Bienne, 26 février 2003			
No	**Sexe-Age**	**Réponse après expérience et arguments**	**Analyse**
*44 a	14G=10	pétanque : plus lourde donc plus vite	**Pas de contre-intuitivité**
b	12F=9	idem	**Pas de contre-intuitivité**
c	13f=9	idem	**Pas de contre-intuitivité**

Classe spéciale, Bienne, mars 2003			
No	**Sexe-Age**	**Réponse après expérience et arguments**	**Analyse**
*45 a	31F=10	ensemble, pas d'étonnement	**Pas de contre-intuitivité**
b	32F=10	idem	**Pas de contre-intuitivité**

- 12.2.2.2. Le ludion

ENTRETIENS DE TYPE 1

Classe primaire, Bienne, 26 février 2003				
No	**Sexe-Age**	**Réponse avant expérience et argument**	**Réponse après expérience et arguments**	**Analyse**
*49	4F-9 1/2	Anticipation positive, si on tape il descend… bouger la bouteille. Résultat par hasard	après démonstration - l'eau ne pouvant pas sortir, l'objet descend - l'air doit descendre sinon il ne peut pas sortir - après observation de l'augmentation du niveau d'eau, « quand on presse ça devient plus lourd, alors ça coule »	Après démonstration : **interprétation** en fonction de sa conception initiale Après observation dirigée : compréhension partielle du phénomène, **transformation** de la conception initiale. Explication du « pourquoi » mais pas du « comment ».
*50	5F-9 1/2	Anticipation négative : essaie secouer, remuer, sans succès	après démonstration : il y a de l'eau qui rentre Mais pas d'explication allant au de-là de l'observation.	**Mémorisation** de l'info : l'observation est insuffisante à la compréhension du phénomène.
*51	5G-10	Anticipation : chauffer l'eau pour faire descendre l'objet (pas d'explication), secouer	après démonstration : c'est l'air qui descend après observation : « de l'eau entre et ça fait plus lourd »	Fait appel aux propriétés connues des expériences avec de l'eau (chauffer, secouer, air qui « flotte »). L'observation le conduit à l'explication du « pourquoi » mais pas du « comment ».
*52 a	6F=9	Anticipation positive : taper sur le bouchon	après démonstration : il y a du sel (confirmation en montrant de micro-bulles accrochées à la bouteille) après observation : « on dirait qu'elle est un peu glacée »… » c'est comme un petit peu dedans que ça aspire »…« l'eau elle rentre dans le tuyau pis ça fait plus lourd pis ça descend »	S'accroche aux **éléments perturbateurs** (bulles) puis fait **appel à d'autres conceptions** erronées (vide qui aspire) pour trouver une explication au fait que l'eau entre dans le ludion. Finit sur l'explication du « pourquoi » mais pas du « comment ».
b	6G=12	secouer, pas de résultat	après observation : « dedans il y a un petit peu d'eau, mais il y a aussi de l'oxygène… de l'air. »… » Il descend pis il remonte »	**L'observation dirigée** conduit à l'explication du « pourquoi » mais pas du « comment ».
*53 a	7G=10	première impression : c'est impossible à peine touche-t-il la bouteille et voit le ludion bouger : « Ah oui, j'ai pigé! Je presse comme ça, pis après y a l'eau qui monte, pis après ça coule. »	« parce que j'ai vu ce petit trou et je me dis mais à quoi ça sert, là. Moi je presse là et je vois l'eau qui monte, là. »	L'**observation spontanée** conduit à l'explication du « pourquoi » mais pas du « comment ».
b	7F=8 1/2	… ne peut que suivre l'explication de son camarade		

Classe spéciale, Bienne, mars 2003				
No	**Sexe-Age**	**Réponse avant expérience et argument**	**Réponse après expérience et arguments**	**Analyse**
*54 a	9G=10	faire une tornade, taper la bouteille	après démonstration : « quand je serre, le truc il descend. Ça lance de l'eau là (on voit le petit jet d'eau qui fait monter l'eau dans la pipette) ». Ne peut pas expliquer pourquoi ça descend après observation : « c'était de l'eau gazeuse avant! » C. sort le ludion, fait observer que le gaz qui est dedans = air qu'on respire, remet dans bouteille. « L'air peut faire monter et l'eau peut faire descendre » QC : Mais alors, qu'est-ce qui se passe avec l'air? L'air, il laisse rentrer l'eau? « Un peu. Mais quand il veut monter, l'eau, elle part. ». Il continue son explication en prenant comme analogie les montgolfières.	**Création d'une conception** par l'observation, la déduction (il y a de l'air parce que c'était de l'eau gazeuse) et **appel à d'autres conceptions pour confirmer cette nouvelle conception** (montgolfière).

ENTRETIENS DE TYPE 2

Classe primaire, Bienne, 26 février 2003			
No	**Sexe-Age**	**Réponse après expérience et arguments**	**Analyse**
*61 a	11F=9 1/2	Pas trouvé le « truc ». Après démonstration : « il y a l'eau qui monte dans le petit truc »	Observation du phénomène sans déduction.
b	13G=9	Pas trouvé le « truc » . Après démonstration: et ça fait plus lourd QC : pourquoi elle entre, l'eau ? Les deux enfants ne peuvent pas répondre.	**L'observation spontanée** conduit à l'explication du « pourquoi » mais pas du « comment ».
*62 a	14G=10	Réussi par hasard. Pas d'explication. Il observe l'air dans le ludion et acquiesce quand 12F observe quelque chose, il propose « ça fait des molécules », mais ne peut rien dire de plus quand C. lui demande. Finalement, il ne décolle pas du seul fait que « quand on presse, il descend ».	Le fait d'avoir trouvé la solution semble lui suffire, l'observation du phénomène ne conduit à aucune déduction.
b	12F=9	Observe qu'il y a de l'air dans le ludion, qu'il a un trou par où pénètre l'eau parce qu'on la « serre ». Le ludion devient plus lourd, il descend.	Bien qu'elle constate la présence de bulles dans la bouteille et qu'à un moment donné, elle tente de les intégrer dans ses explications, elle revient à l'observation de l'eau qui monte dans le ludion et se **crée une conception** relative à la pression.
c	13F=9	Observe la présence de l'air et la montée de l'eau dans le ludion, mais pense que c'est de l'air qui entre dans le ludion lorsqu'on presse. Correspondant mieux à cette impression, elle reste accrochée à la suggestion de 12F sur l'éventuel rôle que peuvent jouer les bulles, sans pour autant donner une explication.	L'observation ne la conduit pas à une explication pertinente et la confrontation avec ses pairs ne l'amène pas à modifier sa conception, au contraire, elle trouve dans les propositions de 12F un moyen de les **conforter**.

Classe spéciale, Bienne, mars 2003			
No	**Sexe-Age**	**Réponse après expérience et arguments**	**Analyse**
*63 a	10G=10	Trouve le truc. Le fait que l'eau entre même s'il y a de l'air dans la pipette ne lui pose aucun problème, au contraire : « quand on presse, comme ça, ça tire l'eau dedans. » Trouve une explication pour confirmer cette conception : « après l'eau ça y fait un peu plus dur (lourd) et le vent il peut pas le tenir en haut, après ça descend. » Le chercheur tente alors de leur faire prendre conscience du fait que ce n'est pas l'air qui aspire, mais que c'est nous qui l'aspirons lorsqu'on respire. Les exemples et les discussions conduisent les deux enfants à revoir leur explication, mais sans aller plus loin que l'air « il monte pis il descend »	La conception initiale est : l'air aspire l'eau quand on presse. On retrouve derrière l'idée que, une fois l'eau dans le ludion, celui-ci devient plus lourd et descend. L'accompagnement par C. permet aux enfants de remettre en question leur conception, mais l'explication ne va pas au-delà de la description des faits.
b	8F=10	Acquiesce en disant « ça aspire ».	**Mémorisation** de l'info
*64 a	11G=10	Ne trouve pas le truc, aimerait un aimant pour attirer le trombone. Après démonstration, émet une hypothèse faisant appel aux « boules » (=bulles) qui montent et qui descendent : « Quand on presse, l'eau elle descend plus parce qu'elle est très lente »… « y a des bulles qui montent et y a beaucoup de bulles qui montent parce que ça, ça descend, parce que ça fait de la place ». Après plusieurs observations dirigées vers l'intérieur de la pipette, il voit le niveau d'eau monter. La présence de l'air n'est pas comprise. Expérience en sortant le ludion pour observer l'air. La différence du volume observé lorsque le ludion est en haut ou en bas est expliquée par « l'air il va dans l'eau… et pis elle reste » QC : mais alors, comme ça se fait que quand il revient en haut, il y a de nouveau beaucoup d'air dedans ? « C'est les bulles. (exclamations des deux enfants) ouais, elle sort, l'air, pis ça fait des bulles et pis ça monte (l'eau) ! QC : et pis après, ces bulles là, elles peuvent revenir dedans ? « non, mais l'eau, l'eau, y a aussi de l'air un peu dedans, ça devient de la vapeur. »	Appel à différentes conceptions pour donner une explication au phénomène observé. - « lenteur » de l'eau…par rapport aux bulles, certainement. - l'air va dans l'eau (on retrouve l'explication donnée pour la respiration des poissons), mêlée à d'autres réminiscence puisque la preuve de la présence d'air dans l'eau, c'est la production de vapeur.
b	9F=10	Aucune idée. Après démonstration : trouve qu'il faut presser « quand vous pressez, la bouteille elle veut monter, alors le truc il descend » Après observation : « Y a un petit trou, alors elle peut pas descendre et si vous pressez, ça pousse l'eau en bas » dans le sens de l'eau, précise-t-elle. La présence de l'air n'est pas comprise. En plus de l'eau, elle ne voit que les pièces métalliques. Expérience en sortant le ludion pour observer l'air. Après l'explication de 11G, elle ajoute : » parce que l'eau, il y a aussi un peu d'air »	Appel à différentes conceptions pour donner une explication : - l'idée que la bouteille veut monter quand on la presse et donc que le ludion veut descendre… - problème de la présence de l'air non connues

*65 a	31F=10	Très étonné du résultat car ni l'un ni l'autre n'a trouvé le truc. Première explication : « il y a un truc qui colle »	En reste à l'explication du « truc de magie »
b	32F=10	Seconde explication : « c'est l'eau qui le fait monter » Il faut une observation poussée pour que les deux filles voient l'eau entrer dans le ludion. QC : « mais, est-ce que c'est tout rempli d'eau? » Bien qu'elles observent l'espace au dessus de l'eau, elles cherchent des explications relatives au plastique du ludion ou à l'eau elle-même. Le chercheur sort le ludion, le vide et le remet dans l'eau. L'air est d'abord assimilé à « rien » et c'est le chercheur qui, par une question les fait exprimer le terme « d'air ». La difficulté réside alors dans le fait que 32F pense que l'air sort par le trou en bas, alors que 31F pense qu'il reste dans le ludion, mais qu'on ne le voit pas.	L'évolution des conceptions se fait au niveau de la qualité de l'explication. Passe de « ça colle » ou « c'est l'eau » à une explication basée sur l'observation dirigée. La présence de l'air reste incomprise.
*66 a	14F=13	Aucun des deux ne trouve le « truc ». Après démonstration, n'ont aucune explication. Après observation, ne parviennent pas à identifier l'air. Pour eux, c'est « rien ». Le chercheur sort la pipette et « souffle » l'air au visage des enfants. Ceux-ci l'identifient.	Aucune compréhension du phénomène. Problème d'identification de l'air dans le ludion.
b	15G=10 1/2	« L'air elle sort pas, sinon ça fait des bulles. » QR : Ca veut dire que l'air il reste dedans ? Pas de réponse des enfants.	Appel à une conception correcte sur les bulles formées par l'air s'il sortait du ludion pour tenter de trouver une explication.

- 12.2.2.3. Les feuilles amoureuses

ENTRETIENS DE TYPE 1

Classe primaire, Bienne, 26 février 2003				
No	**Sexe-Age**	**Réponse avant expérience et argument**	**Réponse après expérience et arguments**	**Analyse**
*72	4F=9 1/2	pense tout de suite à mettre le sèche-cheveux sur le carton, même après avoir reconnu que le sèche-cheveux n'aspirait pas mais soufflait	pas vraiment étonnée, mais n'a aucune explication	le matériel expérimental induit une solution qui rend l'**expérience non contre-intuitive**
*73	5F=9 1/2	aucune idée	pas vraiment étonnée, aucune explication	le matériel expérimental induit une solution qui rend l'**expérience non contre-intuitive**
*74	5G=10	aucun problème « parce que l'air y rentre dedans, ça aspire » Après que le chercheur lui ai soufflé de l'air au visage, il ne croit plus en sa prédiction, mais ne trouve pas d'autres solutions	étonné du résultat « Parce que ça souffle »	**la conception initial**e « le sèche-cheveux aspire de l'air » **rend l'expérience non contre-intuitive**
*75 a	6F=9	les trombones vont crocher le carton, en même temps que le sèche-cheveux va l'aspirer Malgré le constat que le sèche-cheveux rejette l'air, elle pense qu'il faut poser le sèche-cheveux dessus	Etonnée parce que le sèche-cheveux réagit comme un aspirateur. Aucune explication	le matériel expérimental induit une solution qui rend l'**expérience non contre-intuitive**

b	6G=12	envisage également que le sèche-cheveux aspire Les nombreux boutons que possède le sèche-cheveux vont faire que le carton va rester dessus	étonné. Aucune explication	Les éléments perturbateurs rendent l'objet « boîte noire », **mémorisation** de l'info.
*76 a	7G=10	Pense que sèche-cheveux aspire, donc juste poser dessus. Après démonstration du fonctionnement, admet que l'air est soufflé, mais hésite sur le résultat. Propose une solution avec des aimants pour attirer les trombones. Réussi l'expérience tout de suite	Même après avoir réussi, continue à dire que « c'est impossible ».	**Rejet** de l'info
b	7F=8 1/2	Pense que sèche-cheveux aspire, idem Après démonstration du fonctionnement, admet que l'air est soufflé et donc que ça ne va pas marcher.	Aucune explication	**Mémorisation** de l'info

Classe spéciale, Bienne, mars 2003				
No	**Sexe-Age**	**Réponse avant expérience et argument**	**Réponse après expérience et arguments**	**Analyse**
*77 a	8G=10	pense tout de suite à poser le sèche-cheveux dessus Après débat sur le fonctionnement du sèche-cheveux, pense que ça ne marchera pas.	étonné, car l'air « pousse »	**Mémorisation** de l'info
b	9G=12	acquiesce. Après débat sur le fonctionnement du sèche-cheveux, pense que ça ne marchera pas. Précise que ça va s'envoler.	problèmes de discipline entre les deux enfants. Le dialogue n'est pas terminé.	-

ENTRETIENS DE TYPE 2

Classe primaire, Bienne, 26 février 2003			
No	**Sexe-Age**	**Réponse après expérience et arguments**	**Analyse**
*83 a	11F=9 1/2	Pas étonnée de la réussite de 13G, car croit que le sèche-cheveux aspire. Explication après expérimentation : ce sont les trombones. C. éteint le sèche-cheveux : carton tombe. Pas d'explication.	**Pas de contre-intuitivité**, **ancre** sa conception initiale (sèche-cheveux aspire) puis recours aux **éléments perturbateur**s pour conforter sa réponse.
b	13G=9	Réussi du premier coup. Etonné, car le sèche-cheveux souffle le vent. Elimine hypothèse des trombones, observe que le vent passe par l'interstice, mais ne parvient pas à expliquer. Reste très surpris du résultat.	**Mémorisation** d'info, avec bonne observation
*84 a	14G=10	Réussi du premier coup. Explication, l'air et les trombones. Son explication fait qu'il n'a aucun étonnement, même si l'air est soufflé. Après expérimentation, il est d'accord pour lâcher son hypothèse.	**Pas de contre-intuitivité**

b	12F=9	L'air fait comme s'il aspirait. Accepte que ce ne sont pas les trombones et part dans une explication sur les turbulences de l'air à la sortie des deux cartons, qui pousseraient l'air sur le carton et ferait « comme si ça aspire ».	**Adaptation** en faisant appel à d'autres conceptions (turbulences) pour parvenir à une explication assez juste.
c	13F=9	Acquiesce à 12F (démonstration avec la bouche) Mais tous sont d'accord pour dire que le sèche-cheveux rejette l'air.	**Adaptation** en faisant appel à d'autres conceptions (turbulences) pour parvenir à une explication assez juste.

Classe spéciale, Bienne, mars 2003			
No	**Sexe-Age**	**Réponse après expérience et arguments**	**Analyse**
*85 a	9F=10	pas d'étonnement. Le vent « colle » le papier. Elle réfute l'hypothèse de l'électricité et dit que sans « vent » ça ne marcherait pas.	**Pas de contre-intuitivité**. **Ancrage** de sa conception initiale, le papier « colle ».
b	11G=10	pas d'étonnement. Le vent « colle » le papier Autre proposition, à cause de l'électricité statique (comme avec les ballons) qui viendrait quand on enclenche le sèche-cheveux.	**Pas de contre-intuitivité. Ancrag**e de sa conception initiale, le papier « colle », tout en tentant de la confirmer en faisant **appel à une autre conception**, l'électricité statique qui apparaîtrait quand on enclenche le sèche-cheveux.
*86 a	31F=10	Réussi du premier coup. Aucun étonnement. « Le vent le prend comme quand on veut le manger » Cette explication reste, même après avoir testé le fait que le sèche-cheveux souffle.	**Pas de contre-intuitivité**. **Ancrage** de sa conception initiale
b	32F=10	Est un peu étonnée, mais se rallie aux explications de 31F. QC : comment se fait-il que le carton s'envole lorsqu'il est plus loin et reste collé quand il est tout prêt ? Réponse :« parce que il est couché »	**Pas de contre-intuitivité**. **Ancrage** de sa conception initiale. **Déformation** d'un fait pour conforter sa position.
*87 a	14F=13	Fais voltiger le carton. Pas d'étonnement quand 15G réussit.	**Pas de contre-intuitivité**.
b	15G=10 1/2	Réussi du premier coup. Pas d'étonnement. Explication lié à l'air chaud, comme dans les montgolfières. Coupure d'enregistrement.	**Pas de contre-intuitivité**, conception confirmée en faisant appel à l'air chaud.

12.2.3. Recherche d'approfondissement : post-test (2004)

Dans l'intégralité de cette seconde recherche, pour alléger le protocole et le temps passé avec chaque enfant, de manière à ménager leur concentration, l'expérience sur la ségrégation a été supprimée. Ce choix est justifié par les résultats moins probants obtenus sur cette expérience dans la recherche préliminaire. L'expérience intitulée « *Chaud ou froid ?* » a également été abandonnée après le pré-test de la recherche d'approfondissement, comme nous l'avons justifié dans la méthodologie, au paragraphe *5.4.4.3. Recherche d'approfondissement (2003-2004)*. Les trois paragraphes suivants récapitulent intégralement, par type d'expérience, les observations et analyses réalisées lors du post-test. Certaines ont été reprises, telles quelles ou sous une formulation légèrement différente, dans les résultats de la section *8.2.3. Recherche d'approfondissement (2003-2004)*.

12.2.3.1. La course des balles

- L'expérience contre-intuitive seule étonne (4 sur 12 : *30, *32, *33, *99) mais ne permet pas d'interprétation du résultat (5 ne donnent aucune explication de ce résultat contradictoire : *30, *32, *33, *39, *99). Quand une explication est donnée, elle reste proche des conceptions initiales. Par exemple, en prenant comme référence la fusée pour expliquer que la balle de pétanque ira plus vite, l'enfant associe « lourd » à « vitesse », sans tenir compte du fait qu'il y ait ou non moyen de

propulsion « *il va encore plus vite quand il est lourd. C'est comme les fusées* (*45b). Son explication après expérience reprend donc ces éléments : « *Elles arrivent en même temps parce que parfois, les plus légères peuvent aller plus vite* (*45b) ».

- Au mieux, l'expérience contre-intuitive peut permettre la mémorisation du résultat de l'expérience, mais sans que celle-ci puisse être opératoire (6 sur 12 : *30, *33b, *34a, *44a, *44b, *99). C'est le cas de l'enfant qui se souvient avoir vu l'expérience à la télévision, donne une prévision correcte, mais n'avance aucune explication sur le « pourquoi ».
- La conception ne peut donc être transformée de manière durable qu'avec un accompagnement. Mais là encore, bien qu'elles soient données de manière interactive et sans recourir à aucune formule ni à aucun vocabulaire scientifiques, on constate que les explications données restent très fortement influencées par les conceptions initiales. En effet, des interprétations telles que celle-ci sont observées : « *Elles arrivent en même temps parce que la lourde elle descend plus vite et celle-là parce qu'elle est légère elle part plus vite* (*30) », voire des simplifications de l'information reçue : « *Parce qu'elles partent en même temps pis elles tombent en même temps* (*34a) » ; « *Parce qu'il y en a une qui est plus légère et l'autre qui est plus lourde* (*44a) ».
- Lorsque l'expérience est trop contre-intuitive, ou du moins lorsque la conception initiale est très prégnante, il peut y avoir rejet pur et simple de l'information (3 sur 12 : *32, *33a, *45), tant lors du pré-test que du post-test. Ce rejet peut apparaître dans l'observation même de l'expérience. En effet, lors du pré-test, 2 enfants (*34a, *34b) n'arrivaient pas à « voir » que les deux balles touchaient le sol de manière simultanée, et ce malgré d'autres enfants « témoins » qui tentaient de le leur faire visualiser. Malgré ce qui pourrait être considéré comme un handicap, l'un des deux enfants, lors du post-test, montre une réelle transformation de ses conceptions, puisque non seulement il se souvient du résultat correct, mais tente une explication simplifiée du phénomène (*34a). Il est intéressant de constater que ce même enfant, lors du pré-test, avait anticipé le résultat en mentionnant la balle de tennis comme étant la plus rapide, « *parce que plus légère* ». Sous l'influence de son binôme, il avait changé sa position, affirmant que ce serait la balle de pétanque « parce qu'elle est plus lourde ». L'ancrage de la conception initiale de son binôme se retrouve dans le post-test puisque ce dernier affirme qu'il se « *rappelle que c'est la balle de pétanque qui arrive la première* » et que sa position ne changera pas, même après l'expérience. Cette déformation du « souvenir » du résultat de l'expérience se retrouve également chez deux autres enfants (*32, *45) qui, tout comme ce dernier rejettent complètement l'information liée à l'expérimentation.
- Ce rejet peut également être observé lorsqu'une certaine transformation de la conception initiale s'est produite lors du pré-test. Ainsi, deux enfants (*39a, *45) avaient très justement constaté l'arrivée simultanée des balles, mais au post-test, ils étaient tous deux revenus à leur conception initiale d'une balle de pétanque allant plus vite parce que plus lourde.
- La contre-intuitivité peut même aller jusqu'à transformer « à l'inverse » une conception initiale. Ainsi, un enfant (*44c) est passé d'une conception initiale « *la boule de pétanque va plus vite parce qu'elle est plus lourde* » à une conception opposée dans le post-test : « *la balle de tennis parce qu'elle est plus légère* ».

12.2.3.2. Le ludion

- Comme pour l'expérience des feuilles amoureuses, c'est avant tout le « truc » qui marque l'esprit des enfants (10 enfants sur 12 s'en rappellent, dont 5 sans aucune hésitation).
    - Sur les 8 enfants qui, au pré-test, déduisent, par observation dirigée, que l'eau entrant dans le ludion, il devient plus lourd et coule (*49, *51, *52a, *53a, *61b, *62b, *63a, *99), 7 conservent cette conception au post-test (*51, *52a, *53a, *61b, *62b, *63a, *99). Parmi ceux-ci, notons que 4 donnent cette explication avant même d'avoir refait l'expérience, alors que pour les 3 autres la manipulation leur est indispensable pour « retrouver » leur explication

(*52a, *61b, *63a). Un seul enfant se souvient tout de suite du « truc » mais ne parvient plus, même après expérimentation à retrouver son explication. « *Il y a de l'air qui monte… non, de l'eau pis ça fait descendre… je sais plus* (*49) ».

- D'une manière assez générale, la présence de l'air est très perturbante, certains enfants ayant de la peine à distinguer si, ce qu'ils observent dans les changements de niveau correspond à de l'eau ou à de l'air. Ainsi, sur les 9 enfants qui mentionnent sa présence, seuls 2 enfants (*62b, *99) s'en détachent pour n'observer que la montée de l'eau et donner directement une explication relative à l'augmentation du poids du ludion. Pour 7 enfants, la première réaction, juste après la démonstration, c'est que « *l'air descend* » (*51) ou qu'il « *doit descendre sinon il ne peut pas sortir* » (*49). « *Dedans, il y a un petit peu d'eau, mais il y a aussi de l'oxygène… de l'air* (*52b) » sans toutefois pouvoir aller plus loin dans son observation. Idem pour (*62a) qui propose en plus que « *ça fait des molécules* » sans pouvoir expliquer quoi que ce soit. La présence des bulles, comme nous l'avons déjà mentionné, est également perturbatrice (*62c). Ainsi, un enfant va même affirmer « *qu'il y a du sel* (*52a) », prenant les bulles pour preuve. Enfin, nous observons une conception qui octroie à l'air un pouvoir d'aspiration. « *Quand on presse, comme ça, ça tire l'eau dedans. Après, l'eau ça y fait un peu plus lourd et le vent il peut pas le tenir en haut, après ça descend* (*63a) » ou « *c'est comme un petit peu dedans que ça aspire* (*52a) ».

- Sur l'ensemble, 2 enfants (*53b, *62c) rejettent totalement l'information, tant au pré qu'au post-test. Si l'un des deux n'est pas du tout entré dans un processus réflexif, visiblement dépassé par l'expérience et les explications de son binôme, le second a au contraire très bien relevé la présence de l'air et la montée de l'eau dans le ludion. Malgré cela, il continue à affirmer que c'est de l'air qui entre dans le ludion, prenant appui sur le rôle présupposé des bulles observables sur les flancs de la bouteille, réflexion suggérée par son binôme (*62c).

- Dans le post-test, on constate trois choses importantes :
  - La première, c'est qu'aucun enfant ne fait plus intervenir des explications en liens avec des éléments périphériques tels que les bulles (*62c, *52a).
  - La seconde, c'est que la présence de l'air continue à être relevée, sans pour autant que nous puissions dire qu'elle perturbe les explications. Le seul point qu'il est possible de relever, c'est que 3 enfants ont retenu quelques éléments concernant la compressibilité des gaz, aspects abordés lors de l'explication de groupe, suite à la remarque faite par le chercheur : « *vous me dites qu'il y a de l'air dans le ludion, mais alors, qu'est-ce qu'il devient cet air quand l'eau entre ?* ». Des éléments de réponse se retrouvent dans des affirmations telles que « *c'est l'air qui pousse* ». Puis, questionné par le chercheur, il explique que, quand on appuie, « *il y a de la pression* », avant de terminer sur « *l'eau monte et puisqu'il y a plus d'eau, l'objet descend* (*62a) ». Idem pour cet enfant qui explique : « *Parce que là, il y de l'air un peu et pis quand on presse l'air, ça presse le petit machin qui est là dedans en bas* ». Suite à la question « *Mais il y a de l'air où, dans la bouteille ?* » posée par le chercheur, l'enfant répond : « *Quand l'eau monte et pis il presse l'air de plus en plus et pis après au bout d'un moment il est obligé de descendre à cause de l'eau* (*99) ». L'explication la plus complète ou du moins la mieux intégrée semble être la suivante : « *parce que ça pousse l'air, y a l'eau qui monte et ça fait plus lourd donc ça descend* (*63a) »
  - Enfin, en plus de ces 3 enfants, nous pouvons affirmer que 6 autres se sont forgés une conception juste mais partielle du phénomène. Cette dernière remarque montre jusqu'à quel point il est difficile pour des enfants d'appréhender des explications très éloignées de leur système de référence. De plus, l'enjeu de la question étant de pouvoir faire descendre le ludion, l'explication relative au poids de l'objet paraît amplement suffisante. Un

accompagnement plus conséquent aurait été nécessaire pour que la perturbation introduite par la question du chercheur concernant le devenir de l'air au moment de la montée de l'eau puisse arriver à « compléter » cette première conception.

12.2.3.3. Les feuilles amoureuses

- Le matériel expérimental a eu un impact très fort sur le comportement et la réflexion des enfants à l'égard de l'expérience, et c'est sans beaucoup d'hésitation que 11 sur 12 proposent d'emblée de poser le sèche-cheveux coiffé du carton sur l'autre carton. Dès lors, l'expérience perd toute sa contre-intuitivité. Pour pallier ce problème, le chercheur a demandé, avant la réalisation de l'expérience, pourquoi ils pensaient que le carton allait « tenir » sur le sèche-cheveux. Tous les enfants ont répondu « *parce que le sèche-cheveux aspire l'air* ». Difficulté de vocabulaire, aspirer et souffler n'étant pas assez différents pour eux ? Adaptation afin de donner une cohérence à leur solution, très intuitive ? Conception d'un sèche-cheveux qui « aspire » l'eau quand on se sèche les cheveux ? Interprétation d'un « dispositif scientifique » où le sèche-cheveux aurait été modifié pour l'occasion ? Bien des interprétations peuvent être données à cet état de fait. Quoi qu'il en soit, il a fallu que le chercheur « prouve » que le sèche-cheveux soufflait de l'air en projetant ce dernier contre le visage des enfants, tout en leur demandant si « *un sèche-cheveux, alors, c'est comme un aspirateur ?* » pour qu'ils remettent en question leur première explication. Mais cette remise en question n'a pas été systématique, puisque seuls 4 enfants (*74, *76b, *83b, *99) reviennent sur leur prédiction, alors que, malgré le fait qu'ils constatent que le sèche-cheveux souffle, 7 enfants (*72, *75a, *75b, *76a, *84a, *84b, *84c) posent quand même d'emblée ce dernier sur la feuille de carton. Un seul n'a aucune idée, ni aucune proposition.
- Au delà du fait que le matériel proposé suggère la solution au problème, le résultat obtenu renforce encore cette conception initiale d'un sèche-cheveux qui aspirerait. Ceci se confirme par les réflexions des enfants ayant participé au pré-test de type II, c'est-à-dire sans anticipation préalable du résultat de l'expérience. En effet, tous trouvent « normal » que le carton tienne sur le sèche-cheveux puisque celui-ci aspire l'air. Un tel constat pourrait expliquer, en partie du moins, que sur les 8 enfants qui se souvenaient du « truc », à savoir poser le sèche-cheveux sur le carton.
    - 2 continuent à donner une explication dans laquelle le sèche-cheveux continue à aspirer l'air (*74, *84c). L'expérience a donc contribué à ancrer une conception initiale erronée.
    - 1 n'envisage aucune explication (*76b). A ce niveau, seule une information anecdotique est mémorisée, sans aucune opérationnalité.
    - 1 ne comprend plus comment ça pouvait tenir puisque l'air est soufflé. Il donne alors une explication relative à la présence des trombones (*84a). Dans un tel cas, nous pouvons avancer que la transformation se situe exclusivement sur le fait qu'un sèche-cheveux ne fonctionne pas comme un aspirateur.
    - 1 déforme son « souvenir » du résultat en fonction du fait qu'il se souvient que l'air était expulsé du sèche-cheveux. Il affirme donc que le carton tenait dessus… mais à une certaine hauteur (*84b). Cet exemple illustre parfaitement la manière dont une information non comprise peut être déformée pour rester en cohérence avec une conception. En l'occurrence, le fait que cet enfant ait pris conscience que le sèche-cheveux expulse de l'air rend impossible le fait que le carton reste « collé » au sèche-cheveux. Ceci est d'autant plus étonnant que, lors du pré-test, une explication relative aux turbulences de l'air à la sortie du sèche-cheveux faisait penser que cet enfant serait en mesure de comprendre une explication plus élaborée. C'était sans tenir compte du fait que cette explication n'avait qu'un seul but, rendre compatible la réalité avec son intuition de départ, à savoir que le sèche-cheveux aspire l'air.
    - 3 pensent qu'un lien fort existe entre le fait que l'air est justement expulsé et que le carton tienne sur le sèche-cheveux. Parmi ces 3 réponses, notons que l'une d'entre elles reste très

simplifiée : « *parce que ça bouche l'air* (*76a) », alors que les deux autres ont un souvenir assez précis du phénomène, expliqué en groupe suite au pré-test : « *ça lui soufflait dessus (elle montre entre les deux cartons) et pis après l'air qui venait comme ça (elle montre l'air ambiant) ça le gardait couché (elle appuie sur le carton)* (*72) », « *ça tenait à cause de l'air, qui souffle pis après il s'éparpille, comme ça, pis après là il … ouais vous nous aviez expliqué que c'était un peu comme des petites graines et pis qu'elles voulaient toujours se rejoindre ensemble alors ça souffle, comme ça, pis celles-là elles revient (il montre l'air ambiant qui appuie sur le carton)* (*99) ».

- Parmi les 4 restants, nous notons que :
  - 3 ne se souviennent absolument plus du « truc » et n'ont aucune proposition (*75a, *75b, *63a). Cet état de fait correspond à un rejet pur et simple de l'information, celle-ci se trouvant trop « décalée » par rapport à la conception initiale.
  - 1, tout en ne se souvent plus du « truc », pense à poser le sèche-cheveux sur le carton, puis se ravise en réalisant que l'air sort du sèche-cheveux (*83b). Dès lors, il n'a pas d'autre idée. Là encore, la seule acquisition durable se situe dans le fait que le sèche-cheveux ne fonctionne pas comme un aspirateur. Dans ce dernier cas, on peut s'étonner du peu de transformation de la conception initiale. En effet, lors du pré-test, cet enfant avait été extrêmement surpris de découvrir que le sèche-cheveux n'aspirait pas de l'air, alors que, sans anticipation du résultat, il avait spontanément placé le sèche-cheveux sur le carton. Il avait ensuite émis plusieurs hypothèses, portant notamment sur la présence des trombones, puis les avaient éliminées en observant de manière très fine l'écoulement de l'air entre les deux feuilles de carton. Ce premier résultat aurait pu nous conduire à penser que cet enfant accéderait à une mémorisation durable du résultat de l'expérience, voire à la compréhension de l'explication donnée en groupe suite au pré-test.

INDEX DES PRINCIPAUX TERMES TECHNIQUES UTILISES

A

accommodation, 43, 44, 46, 48, 58, 60, 62, 64, 65, 75, 188, 262, 288
accompagnement, 46, 79, 146, 165, 184, 204, 208, 228, 235, 236, 237, 238, 240, 248, 250, 252, 257, 262, 263, 301, 313, 317, 319
activation, 82, 89, 90, 101, 104, 110, 115, 117, 132, 133, 166, 168, 181, 188, 189, 195, 209, 215, 227, 235, 274, 285
  attention--, 110, 181
  barrière d'-, 133, 139, 156, 170, 171, 175, 178, 181, 184, 188, 189, 192, 193, 194, 195, 196, 197, 204, 206, 209, 211, 218, 221, 225, 238, 252, 261, 264, 273
  circulation d'-, 50
  coordination--, 113
  courbe d'-, 130, 156, 174, 202, 207, 274
  énergie d'-, 195, 204, 207
  enthalpie d'-, 196
  enthalpie libre d'-, 133, 196
  entropie d'-, 133, 194, 196, 208, 218, 221
  --facilitation, 110
  fonction d'-, 110
  processus activé, 196, 204, 218, 221, 227, 296
  règles d'-, 65, 66, 67, 82, 83, 105
  vallée d'-, 204
affinité, 69, 168, 171, 172, 209, 210, 234
affordance, 34, 128, 251, 252
aires cérébrales. *Voir* cerveau
allostérie, 21, 69, 81, 127, 131, 132, 137, 155, 156
allostérique, 21, 51, 81, 84, 85, 105, 129, 130, 135, 145, 158, 160, 163, 165, 174, 175, 176, 178, 189, 190, 206, 214, 215, 216, 217, 221, 224, 225, 226, 231, 232, 234, 240, 258, 261, 264, 267, 274
  modèle-, 20, 21, 23, 24, 27, 31, 32, 47, 48, 52, 55, 59, 60, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 74, 75, 76, 81, 82, 83, 84, 85, 94, 97, 99, 101, 104, 106, 107, 108, 113, 114, 124, 126, 127, 129, 130, 131, 132, 134, 135, 136, 137, 138, 139, 145, 146, 147, 150, 155, 156, 161, 171, 174, 178, 185, 186, 187, 193, 208, 209, 211, 212, 213, 214, 216, 217, 218, 228, 231, 238, 241, 248, 250, 253, 258, 261, 262, 268, 269, 273, 274, 275, 282, 284, 285
  protéine-, 69, 132, 155, 157, 164, 178
analogie, 21, 29, 64, 81, 128, 129, 135, 137, 138, 153, 155, 156, 157, 158, 160, 163, 164, 165, 175, 176, 178, 188, 189, 190, 193, 206, 208, 214, 215, 232, 275, 312
apprendre, 15, 16, 19, 20, 23, 24, 25, 27, 29, 30, 31, 33, 34, 36, 38, 39, 40, 42, 43, 44, 47, 48, 49, 50, 52, 53, 55, 59, 64, 68, 69, 70, 71, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 83, 85, 102, 106, 107, 109, 111, 116, 120, 122, 123, 126, 127, 129, 130, 132, 133, 136, 137, 155, 157, 160, 182, 184, 185, 186, 187, 188, 195, 201, 204, 206, 212, 213, 215, 216, 217, 218, 223, 224, 225, 228, 229, 231, 234, 251, 262, 268, 273, 277, 282, 283, 284, 292
apprentissage
  coordonnée d'-, 190, 192
  mécanismes d'-, 104, 273
  modèle d'-, 29, 31, 53, 68, 82, 84, 85, 127, 261
  processus d'-, 16, 20, 21, 23, 24, 25, 29, 30, 51, 57, 68, 93, 96, 120, 123, 124, 126, 127, 128, 132, 133, 135, 136, 137, 138, 153, 155, 156, 170, 171, 174, 178, 182, 186, 188, 189, 192, 193, 196, 204, 205, 206, 207, 209, 211, 214, 215, 218, 221, 222, 225, 226, 262, 269, 273, 274
assimilation, 33, 43, 44, 46, 58, 60, 64, 159, 188, 262

B

barrière d'activation. *Voir* activation
behaviorisme, 33, 38, 39, 40, 41, 45, 50, 51, 52, 67, 83, 161
biais
  -cognitif. *Voir* cognitif
  -perceptif, 211

C

cartes corticales. *Voir* cerveau
catalyse. *Voir* effet catalytique
cerveau, 23, 30, 32, 33, 34, 35, 42, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 95, 99, 100, 102, 103, 110, 111, 112, 115, 119, 120, 121, 122, 123, 128, 157, 273, 275, 285
  aires cérébrales, 88, 89, 90, 99, 100, 101, 102, 104, 116, 121, 122, 128, 130, 131, 160
  cartes corticales, 99, 100, 101, 102, 128, 131, 158, 281
  étage cérébral, 100
  exaptation, 103
  lobe cérébral, 100, 115
  mesomaps, 159
  micromaps, 101, 158

neurone, 50, 88, 89, 99, 100, 101, 104, 116, 117, 119, 122, 123, 128
plasticité neuronale, 23, 33, 95, 102, 104, 122, 139, 157
recyclage neuronal, 20, 95, 101, 102, 103, 104, 115, 116, 131, 139, 156, 157, 159, 217
changement conceptuel, 20, 35, 47, 48, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 81, 82, 84, 94, 99, 101, 114, 126, 127, 132, 134, 137, 139, 155, 166, 197, 200, 206, 208, 211, 273, 278, 279, 280, 281, 283, 285, 287, 290, 291, 292
cognitif, 43, 44, 50, 60, 83, 98, 118, 125, 134, 165, 166, 176, 182, 184, 201, 203, 206, 211, 216, 221, 223, 234, 251, 255, 278, 279, 283
biais-, 20, 105, , 166, 169, 173, 180, 182, 184, 232, 233, 239, 244, 250, 261
développement-, 44, 110, 113, 279, 285
infra-, 48, 69, 83, 134, 211, 212
méta-, 48, 83, 134, 136, 212, 218, 252
modèle-, 30, 50, 51, 118, 127, 161
péri-, 134, 210, 211, 217, 218, 227
pli-, 131, 133, 157, 161, 176, 181, 188, 189, 200, 203, 205, 211, 212, 217, 227, 232, 233, 235, 256, 261, 262
principes-, 97, 160
processus-, 21, 49, 59, 83, 105, 108, 109, 123, 128, 131, 132, 137, 163, 167, 174, 183, 184, 186, 188, 189, 190, 210, 215, 217, 219, 226, 227, 295
profils-, 203, 204
système-, 79, 132, 139, 158, 234, 235, 269, 271, 274
temps-, 114, 157
traitement-, 21, 110, 133, 171, 173, 233, 269
cognition, 30, 31, 49, 50, 67, 85, 86, 87, 93, 94, 115, 119, 181, 277, 280, 281, 285
cognitivisme, 33, 49
méta-, 68, 120, 132, 181, 211, 212, 217
psychologie cognitive, 23, 48, 49, 67, 99, 110, 134, 137, 279, 280
-sociale, 86, 119
communication, 15, 16, 19, 21, 35, 87, 92, 119, 127, 215, 261, 269, 271, 272, 274, 286, 288
conceptions, 21, 27, 29, 31, 32, 42, 47, 48, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 81, 82, 83, 95, 100, 101, 104, 105, 106, 107, 110, 113, 114, 121, 124, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 133, 134, 136, 138, 139, 140, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 156, 157, 158, 159, 160, 161, 162, 163, 164, 165, 166, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 173, 174, 175, 176, 177, 178, 179, 180, 181, 182, 183, 184, 185, 186, 187, 188, 189, 190, 192, 193, 195, 196, 197, 198, 199, 200, 201, 202, 203, 204, 205, 206, 207, 208, 209, 210, 211, 212, 215, 216, 217, 218, 219, 220, 221, 222, 223, 224, 225, 226, 227, 228, 231, 232, 233, 234, 235, 236, 238, 239, 240, 241, 242, 243, 244, 245, 246, 247, 248, 249, 250, 251, 252, 253, 254, 255, 256, 257, 258, 261, 262, 263, 265, 267, 268, 270, 279, 284, 289, 296, 302, 303, 304, 305, 306, 307, 308, 309, 310, 311, 312, 313, 314, 315, 316, 317, 318, 319, 320
-clés de voûte, 217, 219, 226, 227, 232
déstabilisation, 79, 156, 172, 199, 201, 205, 206, 207, 225, 227, 234, 235, 238
méta-, 176, 178, 179, 180, 181, 182, 185, 186, 188, 189, 190, 193, 200, 201, 202, 204, 205, 206, 211, 212, 213, 217, 221, 223, 226, 227, 232, 233, 236, 240, 247
mis-, 56, 60, 279
pré-, 132, 224
réorganisation, 133, 156, 170, 171, 172, 183, 184, 186, 189, 190, 192, 193, 196, 206, 209, 234, 235
conflit
-cognitif, 47, 58, 59, 61, 62, 64, 68, 180, 183, 200, 203, 221
-conceptuel, 61, 62
-sociocognitif, 49, 78
connexionnisme, 49
constructivisme, 33, 37, 42, 44, 45, 46, 47, 48, 51, 52, 56, 58, 61, 63, 67, 75, 82, 83, 84, 104, 110, 161, 173, 186, 188, 262
socio-, 41, 43, 44, 45, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 60, 126, 161, 184, 304
contre-intuitivité, 106, 140, 142, 143, 145, 146, 148, 227, 232, 233, 234, 236, 239, 240, 241, 242, 243, 244, 245, 246, 247, 248, 249, 251, 252, 258, 259, 263, 264, 265, 299, 303, 304, 305, 306, 308, 309, 310, 311, 315, 316, 317, 319
contrôle
-cinétique, 133, 183, 184, 209, 210, 217, 233, 238, 241, 250, 251, 261
-cognitif, 107
-péricognitif, 21, 134, 157, 238
-thermodynamique, 182, 183, 184, 195, 200, 204, 209, 210, 217, 227, 233, 238, 241, 252, 261
courbe d'activation. *Voir* activation

D

degrés de liberté, 168, 171, 172, 174, 190, 192, 203
diagnostic préalable, 143, 145, 147, 240, 241
didactique, 15, 16, 20, 23, 24, 25, 27, 29, 30, 31, 34, 35, 38, 44, 48, 68, 75, 76, 77, 92, 93, 121, 127, 135, 136, 140, 143, 145, 162, 166, 184, 211, 214, 216, 217, 218, 226, 228, 229, 231, 239, 241, 242, 247, 248, 250, 252, 273, 277, 282, 284, 285, 286

E

école, 15, 19, 24, 29, 30, 43, 45, 46, 62, 68, 81, 93, 94, 95, 98, 115, 123, 124, 125, 137, 155, 165, 184, 185, 212, 213, 249, 275, 277, 281, 282, 285, 305, 307
écologie conceptuelle, 58, 59, 60, 83, 132, 182
éducation, 16, 19, 20, 23, 24, 26, 27, 28, 29, 30, 32, 34, 42, 43, 44, 47, 48, 49, 54, 61, 79, 85, 87, 92, 93, 94, 95, 96, 99, 103, 104, 109, 114, 115, 119, 120, 122, 123, 124, 127, 128, 129, 133, 134, 174, 197, 200, 211, 221, 231, 249, 273, 277, 279, 280, 282, 283, 284, 286, 287, 288, 289, 290
effet
-catalytique, 130, 206, 207, 218, 227, 236, 252
-de contexte, 132, 175, 181, 208, 211, 233, 234, 239, 244

-template, 141, 205, 208, 218, 226, 236, 261
-tunnel, 206, 211, 221, 223, 226, 228, 236, 261
émotions, 25, 27, 48, 50, 67, 68, 69, 79, 83, 86, 87, 99, 100, 106, 111, 112, 113, 119, 120, 134, 136, 150, 201, 211, 212, 213, 219, 225, 227, 228, 256, 269, 270, 271, 272, 284
empirisme, 34, 35, 37, 41, 50, 51, 52, 53, 65, 83, 84, 102, 123, 161, 163
encombrement stérique. *Voir* stérique
énergie d'activation. *Voir* activation
enseignement, 15, 16, 21, 23, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 37, 38, 39, 40, 41, 44, 47, 48, 50, 51, 53, 55, 56, 59, 62, 63, 64, 65, 66, 72, 73, 74, 75, 80, 85, 87, 94, 98, 114, 116, 117, 119, 121, 123, 124, 126, 132, 143, 161, 167, 215, 218, 220, 225, 226, 250, 261, 264, 267, 274, 275, 277, 278, 279, 283, 292, 295
enthalpie, 133, 138, 193, 196, 203, 218, 221, 222, 223
-(libre) d'activation. Voir *activation*
-libre, 133, 196, 203, 222
entretien dirigé, 143
entropie, 25, 130, 133, 134, 138, 170, 173, 174, 180, 182, 188, 193, 194, 196, 203, 204, 205, 206, 208, 218, 221, 222, 223, 228, 238, 275
- d'activation. *Voir* activation
environnements didactiques, 21, 31, 48, 53, 69, 75, 76, 77, 78, 81, 82, 83, 84, 85, 129, 135, 136, 137, 139, 140, 150, 153, 160, 208, 211, 215, 216, 217, 218, 219, 220, 221, 222, 223, 224, 225, 226, 227, 228, 229, 230, 231, 258, 261, 262, 268, 274, 295, 296, 297
épistémologie, 16, 20, 29, 32, 34, 35, 47, 58, 59, 60, 63, 66, 68, 81, 113, 119, 135, 137, 139, 150, 153, 155, 161, 265, 273, 282, 285
état de transition, 26, 133, 136, 139, 140, 189, 191, 193, 194, 196, 197, 205, 206, 208, 218, 221, 222, 223, 225, 226, 227, 235, 236, 274
éthique, 80, 88, 123, 124, 125, 270
exaptation. *Voir* cerveau
expérience, 21, 30, 35, 36, 37, 45, 58, 62, 64, 66, 72, 77, 80, 82, 95, 97, 106, 112, 115, 117, 131, 132, 135, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 153, 167, 171, 175, 178, 179, 180, 181, 199, 204, 208, 209, 210, 217, 224, 226, 227, 228, 231, 232, 233, 234, 235, 236, 237, 238, 239, 240, 241, 242, 243, 244, 245, 246, 247, 248, 249, 250, 251, 252, 253, 254, 255, 256, 257, 258, 260, 262, 263, 264, 265, 274, 281, 282, 297, 302, 303, 304, 305, 306, 307, 308, 309, 310, 311, 312, 313, 314, 315, 316, 317, 318, 319, 320
-contre-intuitive, 21, 72, 78, 131, 135, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 153, 204, 210, 224, 226, 227, 228, 231, 232, 233, 234, 235, 236, 237, 238, 239, 240, 241, 242, 244, 247, 248, 249, 250, 253, 254, 258, 260, 262, 263, 264, 274, 297, 316, 317

F

fiabilité, 197
fonctions
-d'activation. *Voir* activation
-d'affinité, 171, 234
-d'apprentissage, 192, 193, 197, 206, 217, 221, 224, 235, 273
-d'optimisation, 173, 174, 175
-de réorganisation, 172
-de traitement cognitif, 234

H

heuristiques, 20, 83, 105, 106, 107, 108, 109, 111, 112, 113, 114, 130, 131, 132, 133, 134, 136, 138, 139, 144, 157, 163, 165, 166, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 173, 174, 175, 176, 177, 178, 180, 181, 182, 183, 184, 185, 186, 188, 189, 190, 192, 193, 197, 201, 202, 204, 205, 208, 211, 212, 217, 220, 221, 225, 226, 227, 231, 232, 233, 234, 235, 236, 240, 247, 251, 255, 257, 261, 262, 274
accessibilité, 106, 107, 108, 131, 132, 133, 134, 136, 139, 153, 170, 171, 178, 179, 202, 217, 223, 249
hyper
-espace, 169, 174, 190
-surface, 133, 169, 170, 173, 181, 190, 193, 194, 203, 207, 209, 216, 236, 274, 275

I

impulsion, 194, 195, 203, 204, 218, 221, 228, 238, 262
infracognitif. *Voir* cognitif

M

médiation, 15, 19, 21, 23, 30, 42, 53, 55, 59, 78, 81, 140, 143, 261, 264, 265, 266, 267, 268, 279, 282, 284, 290
mémétique, 81, 138, 202, 206
mémoire, 35, 49, 85, 87, 99, 103, 105, 110, 113, 120, 125, 188, 305
mesomaps. *Voir* cerveau
méta-
cognitif. *Voir* cognitif
cognition. *Voir* cognition
conceptions. *Voir* conceptions
métaphore, 21, 51, 52, 64, 65, 69, 70, 81, 82, 128, 130, 131, 132, 137, 138, 155, 156, 157, 160, 173, 186, 203, 208
micromaps. *Voir* cerveau
misconceptions, 56, 60, 291, *Voir* conceptions
modèle cadre SRK, 20, 104, 107, 109, 131, 133, 160, 165, 167, 168, 169, 232, 249

N

naïves
théories-, 29, 30, 46, 55, 56, 64, 66, 83, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 106, 111, 119, 126, 130, 131, 139, 159, 160, 185, 217, 219, 225, 227, 232, 261, 282
neuromythes, 120, 124
neurone. *Voir* cerveau

O

optimisation, 133, 168, 169, 170, 173, 174, 189, 190, 221

P

paradigme, 20, 29, 30, 31, 32, 34, 47, 57, 58, 60, 64, 65, 67, 71, 84, 93, 94, 102, 110, 111, 113, 139, 157, 177, 178, 181, 188, 189, 200, 201, 203, 211, 212, 217, 227, 232, 233, 262, 273, 282, 289
pédagogie, 24, 27, 29, 30, 31, 32, 38, 39, 40, 41, 44, 45, 46, 49, 50, 52, 53, 65, 79, 85, 94, 95, 104, 117, 119, 127, 143, 261, 280, 282, 283, 286, 287, 288, 289
  pédagogique, 15, 16, 17, 19, 20, 21, 24, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 34, 35, 37, 39, 40, 41, 42, 44, 45, 48, 50, 51, 52, 53, 55, 57, 59, 63, 64, 67, 68, 73, 76, 77, 78, 80, 81, 84, 85, 96, 113, 114, 115, 117, 120, 123, 124, 127, 128, 129, 135, 136, 137, 139, 140, 143, 144, 147, 150, 153, 173, 174, 184, 195, 196, 203, 207, 208, 211, 212, 215, 216, 217, 218, 219, 221, 224, 225, 226, 227, 228, 229, 230, 231, 232, 236, 238, 239, 241, 242, 243, 249, 258, 259, 260, 261, 262, 263, 264, 265, 267, 268, 269, 274, 282, 284, 285, 290
perceptions, 44, 49, 60, 67, 74, 85, 86, 87, 99, 100, 103, 107, 111, 112, 121, 129, 159, 163, 166, 168, 198, 210, 211, 239, 245, 264, 270, 288, 309
péricognitif. *Voir* cognitif
phénoménologie, 26, 27, 55, 66, 85, 127, 128, 130, 131, 139, 216, 264, 265, 267
  approche phénoménologique, 27, 93, 128, 143, 258, 264, 265, 267, 282
philosophie des sciences, 15, 16, 20, 24, 55, 58, 86, 139, 143, 155, 214, 273, 274, 279
plasticité neuronale. *Voir* cerveau
pli cognitif. *Voir* cognitif
p-prims, 26, 48, 64, 65, 66, 82, 83, 104, 132, 139, 181
préconceptions. *Voir* conceptions
protéine, 69, 130, 131, 132, 136, 137, 138, 155, 156, 157, 158, 159, 160, 161, 163, 164, 165, 174, 178, 193, 199

R

réactivité chimique, 21, 128, 130, 133, 136, 137, 139, 155, 214, 231, 273, 274, 275
recyclage neuronal. *Voir* cerveau
robustesse. *Voir* savoir

S

savoir, 19, 21, 23, 24, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 40, 41, 42, 44, 45, 46, 47, 48, 51, 52, 53, 57, 60, 63, 65, 66, 67, 69, 70, 71, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 83, 94, 99, 107, 114, 123, 128, 129, 130, 131, 132, 133, 134, 138, 139, 143, 145, 150, 155, 156, 157, 158, 159, 160, 161, 162, 163, 168, 169, 171, 173, 174, 177, 180, 184, 185, 186, 188, 189, 190, 192, 193, 194, 195, 196, 197, 200, 202, 203, 204, 205, 206, 207, 208, 211, 215, 217, 218, 219, 221, 222, 223, 225, 226, 227, 228, 232, 233, 234, 235, 238, 246, 250, 251, 252, 254, 255, 262, 266, 268, 270, 275, 277, 284, 295, 302, 319
  robustesse, 108, 133, 134, 139, 187, 197, 204
  souplesse, 133, 134, 138, 170, 171, 185, 187, 188, 193, 194, 196, 203, 208, 218, 223, 261, 275
  stabilité, 48, 67, 73, 83, 126, 130, 133, 134, 136, 139, 157, 161, 168, 173, 185, 186, 187, 190, 192, 193, 195, 197, 199, 200, 201, 202, 203, 204, 209, 212, 215, 218, 222, 224, 228, 235, 252, 254, 261
schème, 26, 43, 45, 107, 110, 113, 129, 138, 159, 160, 170, 171, 186, 188, 192, 193, 197, 200, 202, 203, 204, 208, 212, 215, 220, 222, 225, 232, 234, 235, 236, 238, 240, 248, 252, 255, 256, 262, 264
sciences cognitives, 15, 16, 20, 23, 24, 27, 29, 30, 33, 48, 49, 50, 51, 55, 64, 81, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 92, 93, 94, 95, 96, 99, 104, 105, 109, 114, 116, 117, 118, 119, 120, 123, 124, 125, 126, 128, 139, 143, 155, 174, 214, 266, 273, 274, , 277, 279, 282, 283, 285, 286
site actif, 130, 131, 157, 163, 164, 165, 166, 167, 168, 172, 173, 174, 175, 177, 178, 179, 180, 181, 182, 183, 184, 185, 186, 188, 192, 193, 197, 200, 202, 204, 205, 208, 211, 217, 232, 233, 262
souplesse. *Voir* savoir
SRK. *Voir* modèle cadre SRK
stabilité. *Voir* savoir
stérique, 130, 133, 170, 171, 174, 180, 182

Z

zone proximale de développement, 197, 301

Imprimé à Paris sur les
Presses de l'ESPCI ParisTech
Le 27 mars 2013

Processus d'apprentissage, savoirs complexes et traitement de l'information : un modèle théorique à l'usage des praticiens, entre sciences cognitives, didactique et philosophie des sciences

Cherchant à établir un pont théorique et pratique entre les sciences de l'éducation, les sciences cognitives et la philosophie des sciences, la thèse développe un modèle didactique à l'interface entre ces disciplines : le *modèle allostérique de l'apprendre* développé par Giordan et al. (1992), qui s'inscrit dans le paradigme des *théories du changement conceptuel*.

Nourri par les travaux récents des psychologues cognitifs sur les processus d'apprentissage tels que les *théories du recyclage neuronal* (Dehaene, 2007) ou de l'*inhibition cérébrale* (Houdé & Tzourio-Mazoyer, 2003), ainsi que sur diverses théories relatives à l'élaboration de la pensée telles que l'*économie comportementale* (Tversky & Kahneman, 1982) ou le *modèle-cadre SRK* (Rasmussen, 1990), ce modèle développe et précise le concept d'*allostérie* à travers la description et la formalisation des processus de déconstruction-reconstruction des *conceptions*, qui ont lieu lors des apprentissages complexes.

De la phase de théorisation du modèle, effectuée par un recours aux formalismes de la *réactivité chimique* en accord avec la métaphore initiale de l'*allostérie*, on déduit divers *environnements didactiques* opératoires et féconds pour le praticien de l'enseignement et de la communication des sciences. Ces prévisions théoriques sont alors mises à l'épreuve de l'expérimentation didactique à travers une recherche de terrain sur la notion d'*expérience contre-intuitive* (Eastes & Pellaud, 2004) menée auprès de différents types de publics.

Mots-clés : Processus d'apprentissage – Traitement cognitif de l'information – Changement conceptuel Allostérie – Conceptions – Heuristiques – Biais cognitifs – Contre-intuitivité – Pédagogie

Spécialités : Philosophie des sciences – Epistémologie et didactique des sciences

UFR Philosophie de l'Université Paris 1

Institut d'Histoire et de Philosophie des Sciences et des Techniques (IHPST)
13, rue du Four – 75006 Paris - France

Faculté de psychologie et des sciences de l'éducation de l'Université de Genève

Laboratoire de Didactique et d'Epistémologie des Sciences (LDES)
40 boulevard du Pont-d'Arve – CH-1205 Genève – Suisse